



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

MULTIPARAMETRICKÁ DIAGNOSTIKA

VYSOKOOTÁČKOVÉHO STROJE

MULTIPARAMETRIC DIAGNOSTICS OF HIGH-SPEED MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matouš Bowyer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **Bc. Matouš Bowyer**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce: **doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Multiparametrická diagnostika vysokootáčkového stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem DP je navržení konstrukce kontrolního vzorku a vhodných metrologických parametrů, které mohou být zařazeny do systému sledování a vyhodnocování změn technického stavu stroje (např. odchylky tvaru, zdůvodněné charakteristiky textury povrchu apod.).

Cíle diplomové práce:

Multiparametrická diagnostika vysokootáčkových strojů s důrazem na vibrační diagnostiku.

Navržení konstrukce kontrolního vzorku a vhodných metrologických parametrů pro účely diagnostiky zvoleného stroje.

Návrh, realizace a vyhodnocení experimentů s kontrolním vzorkem.

Formulace doporučení pro diagnostiku zvoleného stroje.

Seznam doporučené literatury:

LEGÁT, Václav. Management a inženýrství údržby. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.

COLOSIMO, Bianca M. Geometric tolerances: impact on product design, quality inspection and statistical process monitoring. London: Springer, c2011. ISBN 978-1-84996-310-7.


LEACH, Richard, ed. Optical measurement of surface topography. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-364-2120-114.

LEACH, Richard. Characterisation of areal surface texture. Heidelberg: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-36458-7.

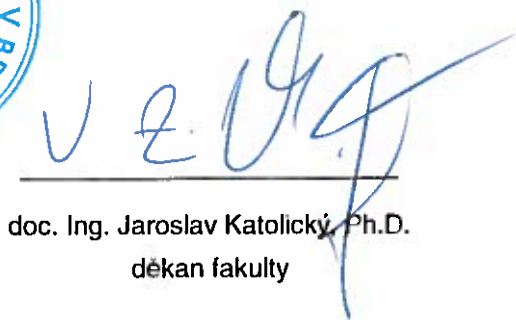
WHITEHOUSE, D. J. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-8201-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 24. 10. 2018



doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Úkolem diplomové práce bylo aplikovat multiparametrickou diagnostiku ke zjištění stavu a opotřebení vysokootáčkového obráběcího stroje. V teoretické části jsou popsány vybrané aspekty multiparametrické diagnostiky s důrazem na vibrodiagnostiku. Nově navržené metrologické parametry pro praktickou část byly zahrnuty do skupiny „metrologická diagnostika“. Bylo provedeno několik různých měření na navrženém zkušebním vzorku. Výsledky měření jsou analyzovány a na jejich základě byly formulovány hlavní přínosy diplomové práce: byl vytvořen výrobní výkres, metodika pro vyhodnocení vzorku a byly formulovány doporučení pro diagnostiku konkrétního stroje a návrhy pro budoucí rozvoj metrologické diagnostiky.

ABSTRACT

The goal of the thesis was applying multiparametric diagnostics to determine the state and wear of a high-speed milling machine. In the theoretical section, selected areas of multiparametric diagnostics have been described as well as a significant focus on vibrodiagnostics. The chosen methods for the practical section were incorporated into the group “metrological diagnostics”. Several different types of measurements have been performed on the designed test piece. The measurements were analyzed and lead to these specific results: a drawing of the test piece, a structured methodology for evaluating the test piece, recommendations for diagnostics of the specific machine, and proposals for the future development of the field of metrological diagnostics.

KLÍČOVÁ SLOVA

Multiparametrická diagnostika, vibrodiagnostika, metrologická diagnostika, geometrické tolerance, textura povrchu, optické měřicí metody, volumetrická přesnost, zkušební vzorek

KEYWORDS

Multiparametric diagnostics, vibrodiagnostics, metrological diagnostics, geometrical specifications, surface texture, optical measurement systems, volumetric accuracy, test piece

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOWYER, Matouš. *Multiparametrická diagnostika vysokootáčkového stroje*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116905>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Róbert Jankových.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji doc. Róbertu Jankových za špičkové vedení diplomové práce a zajištění velkého množství měření v práci. Dále všem vyučujícím na VUT, kteří mi pomáhali s vyhodnocením a objasněním problematiky, zvláště Ing. Mateji Harčarikovi (textura povrchu), Ing. Janu Šrámkovi (měření na ČMI), Ing., Dipl-Ing Michalu Holubovi Ph.D. (volumetrická přesnost) a Ing. Barboře Navrátilové (porovnání kruhovitosti s volumetrií). Dále firmě DATRON AG a jejím zaměstnancům za poskytnutí strojů a možnosti pro vypracování diplomové práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Róberta Jankových, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24.5.2018

.....

Matouš Bowyer

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	MULTIPARAMETRICKÁ DIAGNOSTIKA	13
2.1	Technická diagnostika	13
2.2	Vibrodiagnostika.....	15
2.3	Tribodiagnostika	18
2.4	Termodiagnostika	19
2.5	Defektoskopie	20
2.6	Elektrodiagnostika	21
2.7	Metrologické diagnostické metody.....	22
2.8	Současný stav diagnostických metod výrobních strojů v normách	22
2.9	Volba diagnostických metod pro diplomovou práci	23
3	NÁVRH ZKUŠEBNÍHO VZORKU.....	25
3.1	Diagnostikovaný stroj	25
3.2	Normovaný zkušební obrobek	26
3.2.1	Zkušební obrobek typu A	27
3.2.2	Zkušební obrobek typu B	28
3.3	Návrh zkušebního vzorku	28
3.3.1	Výroba zkušebního vzorku a návrh parametrů obrábění.....	29
3.3.2	Značení vzorků	31
3.3.3	Softwarové vyhlazení	32
3.4	Rozdíly vzorků.....	32
4	APLIKACE ZVOLENÝCH DIAGNOSTICKÝCH METOD	33
4.1	Měření přesnosti kruhové interpolace.....	33
4.1.1	Vyhodnocení měření kruhové interpolace.....	35
4.1.2	Rozšířené měření kruhové interpolace	40
4.2	Kruhovitost a válcovitost	41
4.2.1	Filtrování kruhovitosti a válcovitosti.....	43
4.2.2	Kruhovitost	43
4.2.3	Poznámka k vyhodnocení kruhovitosti.....	45
4.2.4	Válcovitost.....	45
4.3	Porovnání výsledků měření kruhovitosti	46
4.3.1	Analýza skoku vnějšího průměru	49
4.4	Vyhodnocení textury povrchu	50
4.4.1	Terminologická poznámka	50
4.4.2	Vyhodnocení textury bezkontaktní metodou.....	50
4.4.3	Vyhodnocení textury pomocí kruhoměru.....	53
4.4.4	Výběr nejvhodnějších parametrů textury pro předepsání na výkres zkušebního vzorku	56
4.4.5	Porovnání všech parametrů	64
4.4.6	Vyhodnocení profilů z kruhoměru	64
4.4.7	Porovnání všech metod.....	65
4.5	Porovnání rozměrů délek a průměrů.....	65
4.6	Návrhy na další možnosti vyhodnocení.....	66
4.6.1	Vyhodnocení optickou bezkontaktní metodou přístrojem firmy Keyence.....	66
4.6.2	Využití systému Optosurf	68
4.6.3	Charakteristické veličiny dle VDA 2009.....	69

4.7	Porovnání se strojem v provozu	71
4.7.1	Vyhodnocení kruhovitosti	71
4.7.2	Válcovitosti a souosost.....	73
4.7.3	Vyhodnocení textury povrchu	73
5	ZÁVĚR.....	75
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	78
7	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	81
7.1	Seznam zkratk a symbolů	81
7.2	Seznam tabulek.....	83
7.3	Seznam obrázků.....	84
8	SEZNAM PŘÍLOH.....	87

1 ÚVOD

Diplomová práce se zabývá multiparametrickou diagnostikou vysokootáčkového stroje – frézky M8 Cube německého výrobce Datron AG.

Hlavní cíle diplomové práce byly analýza metod pro multiparametrickou diagnostiku CNC frézky, dále návrh kontrolního vzorku, pro který byly navrženy a vyhodnoceny experimenty v oblasti metrologických metod. Dalším cílem bylo porovnání konvenčních metrologických metod (např. měření kruhové interpolace) s metodami moderními. Posledním cílem bylo doporučení pro diagnostiku CNC frézky a doporučení pro pokračování v rozvoji metrologické diagnostiky.

V posledních letech se do popředí zájmu společností dostalo odvětví údržby. Jedná se o kombinaci všech technických, technologických, manažerských, ekonomických a administrativních procesů, které se starají o udržování zařízení v provozuschopném stavu, tj. aby mohl plnit funkci, ke které bylo určeno, nebo k jejich navrácení do provozuschopného stavu. Je to tedy specifický druh podpůrné služby čistě řízené ekonomickým zájmem. Firmy si uvědomily, že dobře naplánovanou údržbou je možné vykázat snížení výrobních nákladů a zvýšení produktivity. [1][2]

V normě [3] zabývající se náklady životního cyklu výrobku je konstatováno, že největší podíl nákladů nečiní pořízení stroje, ani, až na výjimečné případy, vypořádání se s likvidací. Nejvýznamnější částí jsou náklady vlastnické, které zahrnují mimo jiné náklady na provoz a údržbu. Jedním z nejefektivnějších způsobů, jakým se co nejdříve dají předvídat poruchy na stroji, které by znamenaly zvýšení vlastnických nákladů, je multiparametrická diagnostika. [3]

Metody multiparametrické diagnostiky jsou užívány pro předvídaní vzniku rozvoje poruch. V dnešní době jsou využívány jak z dlouhodobého hlediska, je-li třeba ohodnotit a v čase sledovat technický stav zařízení, tak z hlediska krátkodobého – ohodnocení okamžitého stavu stroje. V historii se metody technické diagnostiky zaměřovaly především na hluk, úniky kapalin, přehřátí a vizuálně znatelné opotřebení. Společným znakem je u těchto indikátorů subjektivnost. V současné době se technická diagnostika, díky pokrokům v oblasti senzorů a snímačům značně rozvinula. [1]

Vibrodiagnostika je důležitou součástí moderního inženýrství. Analyzuje dynamické chování systémů a je schopná předvídat poruchu, popřípadě její lokalizaci. Poškození části stroje má vliv na jeho celkovou hodnotu vibrací, které má následně vliv nejen na přesnost stroje, ale i jeho spolehlivost a životnost. [1][4]

Ve firmě, ve které byla diagnostikována frézka, je vysoký potenciál pro zlepšení a rozšíření multiparametrické diagnostiky všech podporovaných strojů, respektive zavedení systému posuzování stavu strojů. Pro diplomovou práci bylo po dohodě s vedoucím a vedením firmy zvoleno vytvoření zkušební vzorku. Při návrhu vzorku byly respektovány specifické vlastnosti zvolené frézky, dále byly zohledněny možnosti měření na FSI a v neposlední řadě také ekonomické aspekty. Novými metrologickými parametry, které byly zkoumány jsou textura povrchu a geometrické tolerance kruhovitosti a válcovitosti. Právě tyto parametry se při vibracích znatelně liší od ideálu. Předložená diplomová práce řeší měření a vyhodnocování navržených metrologických parametrů zkušební vzorku a jejich využití pro určování technického stavu stroje. [5]

Diplomová práce je systematicky rozdělena na úvod, tři hlavní kapitoly a závěr. Dále obsahuje seznam zdrojů, zkratk, symbolů, obrázků, tabulek a příloh.

První kapitola je věnována současnému poznání v oblasti multiparametrické diagnostiky s důrazem na vibrodiagnostiku. Obsahuje také volbu diagnostických metod využívaných v diplomové práci a jejich integraci.

Druhá kapitola je zaměřena na navrhnutí kontrolního vzorku s vhodnými metrologickými parametry pro zvolený stroj.

Ve třetí kapitole byly navrženy realizovány, a pomocí statistických metod vyhodnoceny experimenty s navrženým kontrolním vzorkem. V této kapitole jsou zpracována měření a vyhodnocení: kruhové interpolace, kruhovitosti, válcovitosti, textury povrchu a rozměrů.

V závěru diplomové práce jsou formulovány doporučení pro daný stroj a doporučení pro rozvoj metrologické diagnostiky.

2 MULTIPARAMETRICKÁ DIAGNOSTIKA

Multiparametrická diagnostika zahrnuje velké množství typů diagnostiky. Diplomová práce se věnuje technické diagnostice CNC frézky, a pro teoretický rozbor tedy byly vybrány ty metody technické diagnostiky, které jsou nejhojněji využívány pro posuzování stavu stroje a mohly by být pro diplomovou práci přínosné. [6]

V kapitole je teoreticky zpracována technická diagnostika a dále vybrané metody. V podkapitolách jsou zpracovány vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, defektoskopie, elektrodiagnostika a metrologická diagnostika. Dále je popsán současný stav technické diagnostiky pro vyhodnocování CNC frézek a je provedena konkrétní volba diagnostických metod pro praktickou část.

2.1 Technická diagnostika

Technická diagnostika je v současnosti jedním z významných faktorů využívaných v oboru spolehlivosti (viz. obr. 1). Popisuje typy projevů problémů, jakým způsobem vznikají, jak se vyvíjejí, způsob jejich detekce a jak fungují. Hraje významnou roli v provozu a údržbě zařízení. [7][8]

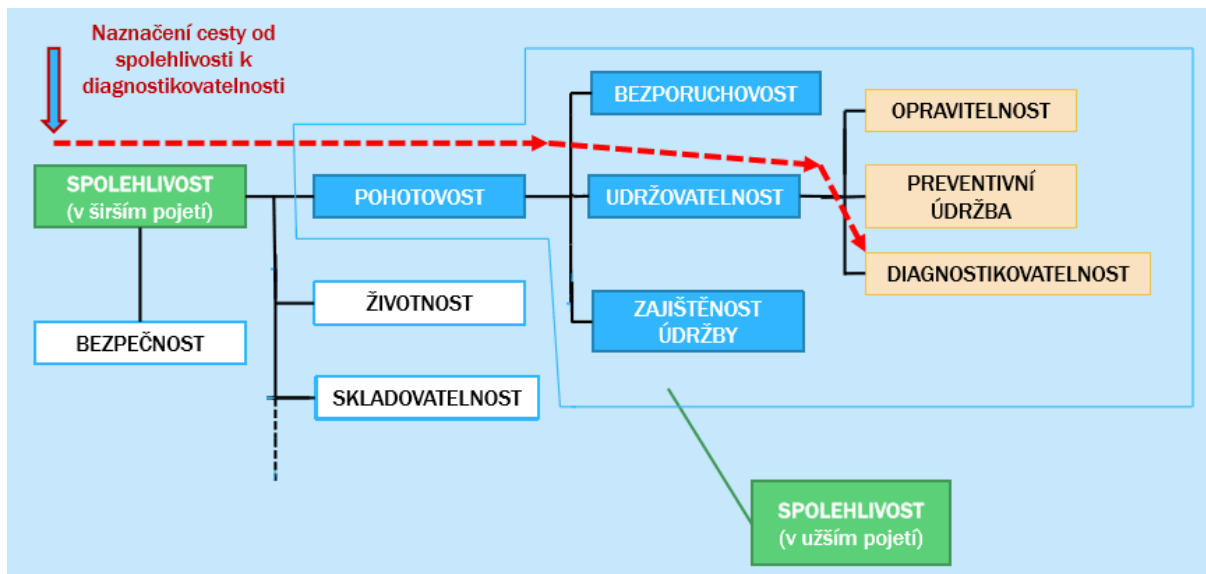
Právě k udržení zařízení v provozuschopném stavu je třeba mít ideálně co největší množství informací o technickém stavu, funkčních vlastnostech a provozních vlastnostech daného stroje. Tyto informace lze získat použitím různých metod technické diagnostiky. [9]

Diagnostika je tedy samostatný vědní obor, který se zabývá nedestruktivními a bezdemontážními (většinou) metodami pro stanovení technického stavu objektu. Jak již bylo zmíněno, technická diagnostika (na rozdíl od lékařské) kombinuje poznání jak heuristické, tak kauzální, popřípadě vychází z matematického modelování. Výsledkem technické diagnostiky je diagnóza, tj. vyhodnocení okamžitého technického stavu objektu a zjištění provozuschopnosti objektu. Zaměřuje se na dva hlavní úkoly, zaprvé identifikace vady nebo poruchy a zadruhé její lokalizace. [6]

Technická diagnostika je jednou z klíčových složek údržby. Údržbou rozumíme kombinaci všech technických a administrativních činností včetně dozoru, zaměřených na udržení objektu ve stavu, nebo navrácení objektu do stavu, v němž plní požadovanou funkci. [6]

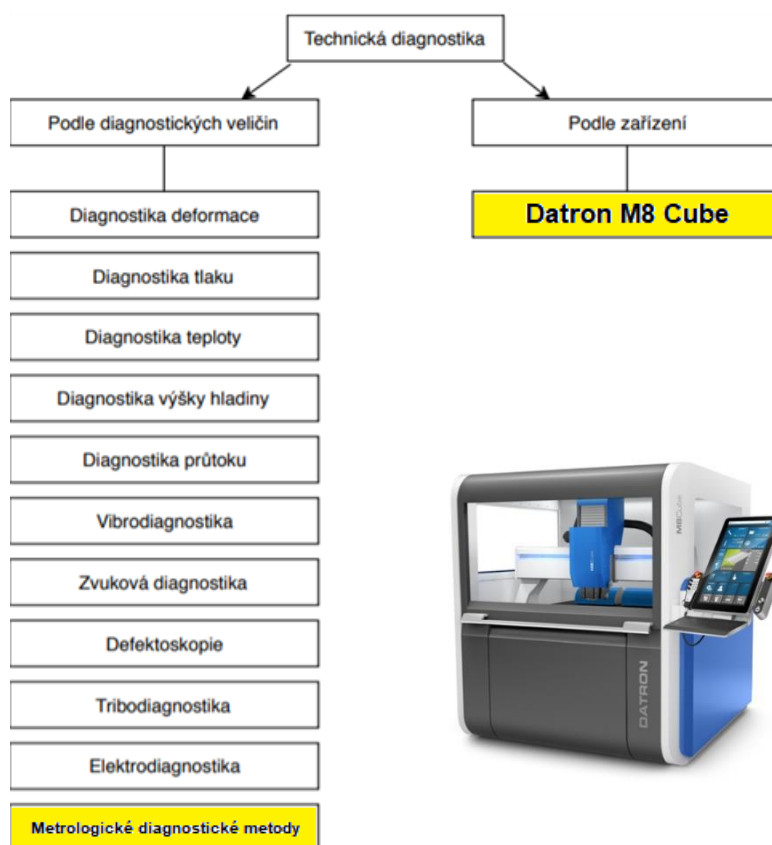
Zde je již vidět provázání s kvalitou strojů a zařízení (ta je definována jako stupeň splnění požadavků souborem inherentních znaků). Jednou ze skupin užitných vlastností kvality, a tedy i znaku kvality produktu jsou vlastnosti spolehlivostní. Spolehlivost je souhrnný termín pro popis pohotovosti a činitelů, které je ovlivňují: bezporuchovost, zajištěnost údržby a již popsaná udržitelnost. Provázání technické diagnostiky (resp. Diagnostikovatelnosti) a spolehlivosti (tzn. i kvality) je vidět na obrázku 1. [6]

Diagnostikování je operace prováděná za účelem zjištění technického stavu stroje a lokalizace porouchané části. Je tedy jednou z klíčových částí spolehlivosti stroje v širším pojetí. Diagnostikovatelnost je vlastnost výrobku být diagnostikován (testován). [6]



Obr. 1) Vztah mezi spolehlivostí a diagnostikovatelností [6]

Rozdělení metod technické diagnostiky je dále znázorněno na obrázku 2. [10]



Obr. 2) Rozdělení technické diagnostiky [10]

Z těchto metod technické diagnostiky jsou, po dohodě s vedoucím, zvoleny pro teoretický rozbor vibrodiagnostika, tribodiagnostika, termodiagnostika, defektoskopie, elektrodiagnostika a metrologické diagnostické metody.

2.2 Vibrodiagnostika

Vibrační diagnostika je jednou z metod technické diagnostiky (ostatní jsou např. provozní, tribodiagnostika, termodiagnostika apod.). Analýzou signálu od vibrace lze mimo jiné zjistit vznikající nebo rozvíjející se závadu. Hlavní výhodou vibrační diagnostiky je její využitelnost. Nejvíce různých typů závad má vliv právě na měřené vibrace, viz. tabulka níže. [11]

Na tomto příkladu je výčet možných závad čerpadla a jak se následně projevují. Jak lze vidět v tabulce 1 níže, všechny závady se projeví změnou ve vibracích. [11]

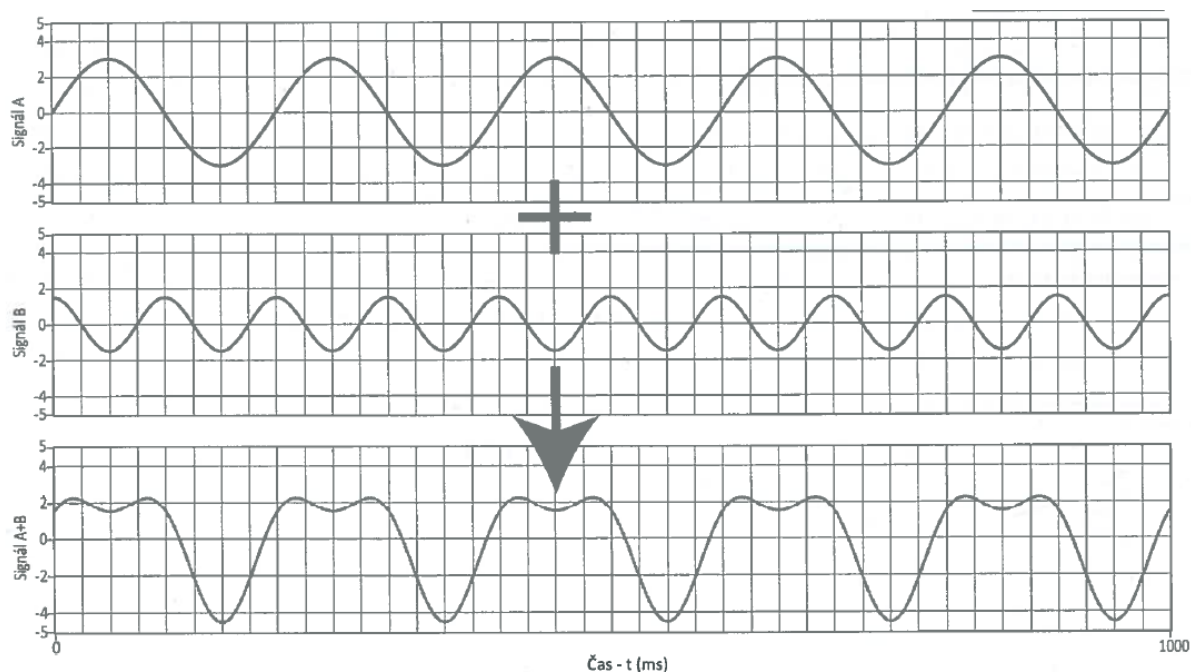
Tab 1) Využití vibrodiagnostiky pro čerpadlo [11]

Typ stroje: Čerpadlo	Změna symptomu nebo parametru									
Závada	Únik kapalin	Měření délek	Výkon	Tlak nebo vakuum	Otáčky	Vibrace	Teplota	Doba oběhu	Znečištění oleje	Netěsnost oleje
Poškozené oběžné kolo										
Poškozené ucpávky										
Excentrické oběžné kolo										
Poškozené ložisko										
Opatřebené ložisko										
Chybná montáž										
Nevyváženost										
Nesouosost										

Vibrodiagnostika je nejvíce používanou metodou pro monitorování technického stavu rotačních strojů. Lze pomocí ní optimalizovat postupy řízení údržby pro zvýšení spolehlivosti, bezpečnosti a životnosti. Přímo tak může ovlivňovat náklady na údržbu, opravy a prostoje. [12]

Vibrace jsou projevem mechanického kmitání stroje, které se projevuje změnou polohy stroje ve zvoleném souřadném systému. Nejjednodušším příkladem je harmonický oscilátor. [13]

Vibrace lze popisovat pomocí výchylky – maximální a efektivní, nebo rozkmitu. Dále pak pomocí frekvence. Skutečné vibrace, avšak nejsou harmonické, ale mají mnohem složitější průběh. Je to způsobeno skládáním různých kmitů ze všech částí stroje. Tento princip je vidět na obr 3. [12][13]

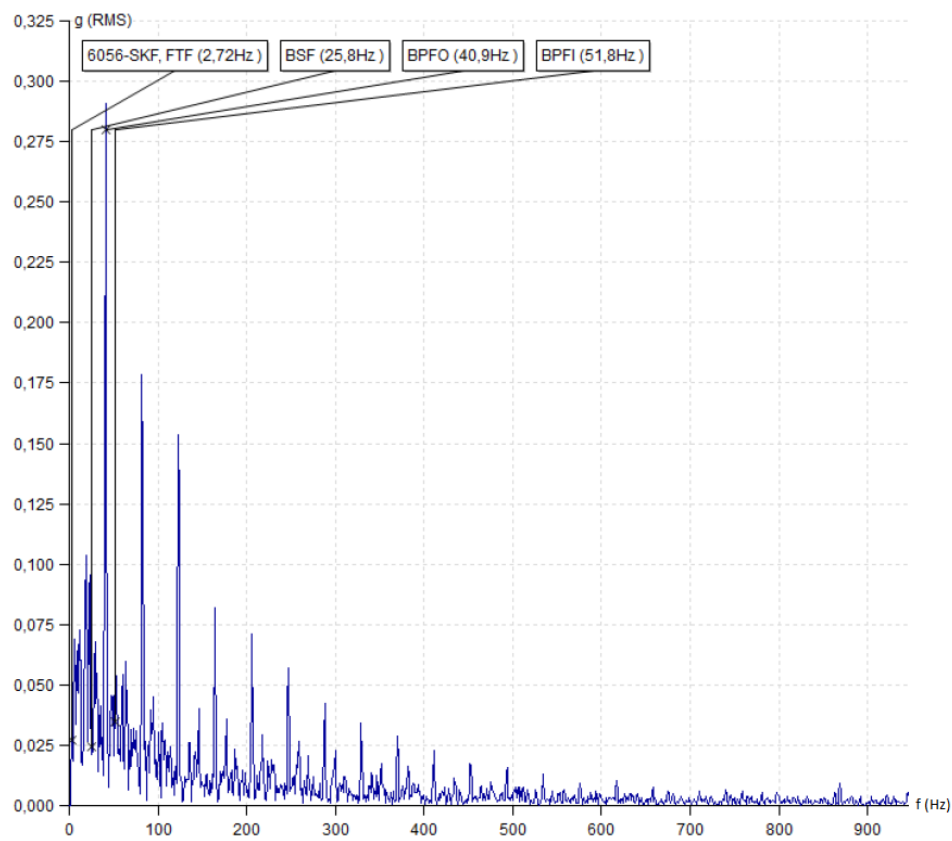


Obr. 3) Princip skládání signálů vibrací [12]

Nástroj, který je určen pro analýzu vibrací je FFT – Fast Fourier Transformation. Jedná se o typ diskretní Fourierovy transformace. FFT převede signál z časové do frekvenční oblasti. Slouží k tomu, abychom původní signál aproximovali rozdělením na množství harmonických funkcí, které je snazší analyzovat. [13]

Měření vibrací se obvykle provádí na místech uložení ložisek, popřípadě co nejbližší k předpokládanému zdroji. Využívají se nejčastěji snímače zrychlení vibrací, fungující na piezoelektrickém principu. Základní typ analýzy je trendování – sledování vývoje. Pokročilejší metodou je pozorování spekter vibrací se zvýšenou pozorností na poruchové frekvence kritických částí stroje. Je založena na tom, že dané části stroje vykazují charakteristické a očekávané výchylky ve spektru signálu (např. nesouososti, nevývaha, poruchy ložisek). [12][13]

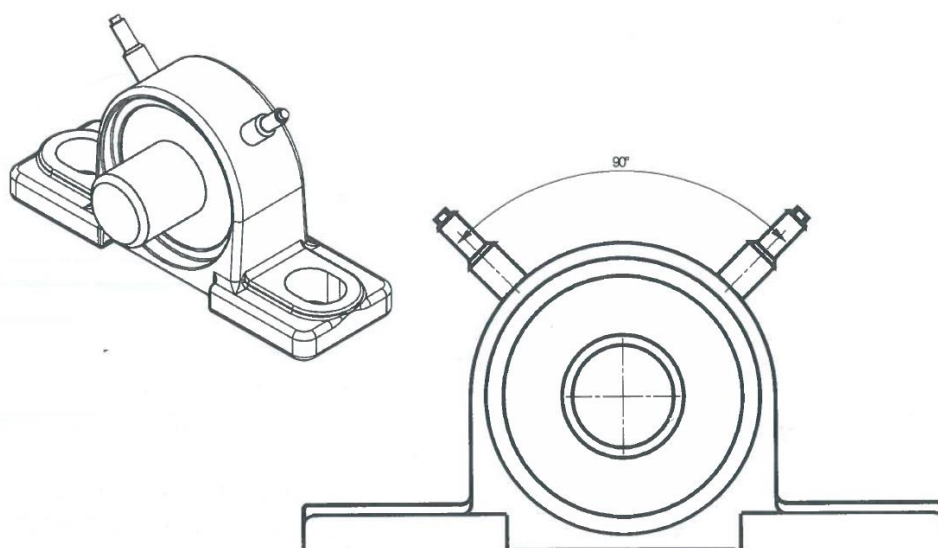
Na následujícím obrázku (obr. 4) uveden příklad z praxe, kde byl diagnostický signál zrychlení vibrací zpracován pomocí FFT a následně na spektrum byla aplikována obálka zrychlení. Jelikož je známý typ ložiska (6056-SKF) je možné do grafu vynést hodnoty frekvencí charakteristických pro daný typ poruch (valivý element, klec, vnitřní a vnější kroužek). Je zřejmé, že je poškozen vnější kroužek, jelikož harmonická frekvence ve spektru odpovídá poruše BPFO. Analýza byla provedena pomocí virtuálního analyzátoru A4410 – Virtual unit od firmy ADASH. [12][14]



Obr. 4) Frekvenční analýza vibrací ložiska SKF 6056 [14]

Vibrace je možné měřit buď jako relativní nebo absolutní. Relativní vibrace sledují pohyb rotoru vůči ložiskům nebo jiné části stroje. Důvodem potřeby relativního měření je přítomnost tlumícího olejového filmu, tudíž absolutní vibrace jsou zkreslené. Relativní měření je také vhodné pro nízko otáčkové stroje. Snímače relativních vibrací se umísťují tak, aby osy svíraly 90°, viz obrázek 5. [12][13]

Absolutní vibrace jsou vibrace stroje nebo jeho části vůči pevné základně. [12][13]



Obr. 5) Umístění snímačů relativních vibrací [12]

Vibrace se hodnotí dle jejich určujících veličin – výchylka, rychlost nebo zrychlení. Při měření relativních vibrací se nejčastěji užívá právě měření výchylky (pomocí senzorů na principu vířivých proudů). Rychlost vibrací se měří snímačem na principu elektromagnetické indukce, ty jsou dnes již ale nahrazeny, kvůli jejich nižší ceně a lepším vlastnostem, snímači zrychlení. [12]

V následujících odstavcích jsou popsány některé užívané metody technické diagnostiky doporučené pro vyhodnocení firmou SKF, tedy metody v praxi využívané. Jak již bylo zmíněno, základním měřením je měření určujících veličin mechanického kmitání (tj. výchylka, rychlost a zrychlení). Analýza se týká oblasti 0,1 – 5000 Hz a vyhodnocuje časový průběh hodnot veličin, popřípadě frekvenční spektrum a fázi. V souladu s normami ČSN-ISO je lze využít k vyhodnocení celkového stavu stroje. Mezi závady detekovatelné měření určujících veličin patří například nevyváženost, nesouosost, mechanické vůle, rezonance konstrukce, ohnuté hřídele, lomy, makroplastické deformace, opotřebení ložisek apod. [10]

Další skupinou je již zmíněné vyhodnocení obálky zrychlení. Ta analyzuje, u přístroje výrobce SKF, oblasti 5–100 Hz, 50 – 1 000 Hz, 500 – 10 000 Hz a 5 000 – 40 000 Hz. Touto metodou lze pomocí časového průběhu a frekvenčního spektra zjistit například defekty ložisek druhé fáze (-pitting), poškození zubů v převodovkách, uvolněné vinutí v elektromotorech atd. [10]

Metoda vyhodnocení vyšších frekvencí se nazývá HFD (High frequency detection – detekce vysokých frekvencí). Tyto metody pracují v oblasti 5 000 – 40 000 Hz, a to pouze s celkovou hodnotou vibrací. Tato metoda je vhodná pro zjištění závad ložisek, ucpávek, převodů atd. [10]

Na práci s nejvyššími hodnotami frekvencí se zaměřuje metoda AEE (Acoustic Emission Envelope – obálka akustické emise). Ta se věnuje oblasti frekvencí mezi 100 000 Hz a 500 000 Hz. Využívá jako první dvě metody časový průběh a frekvenční spektrum. Touto metodou je schopen diagnostik pozorovat vlastnosti mazání (výskyt tvrdých nečistot, správnost mazání), korozi, růst trhlin, první fáze defektů ložisek, elektrický šum, kavitace atd. [10]

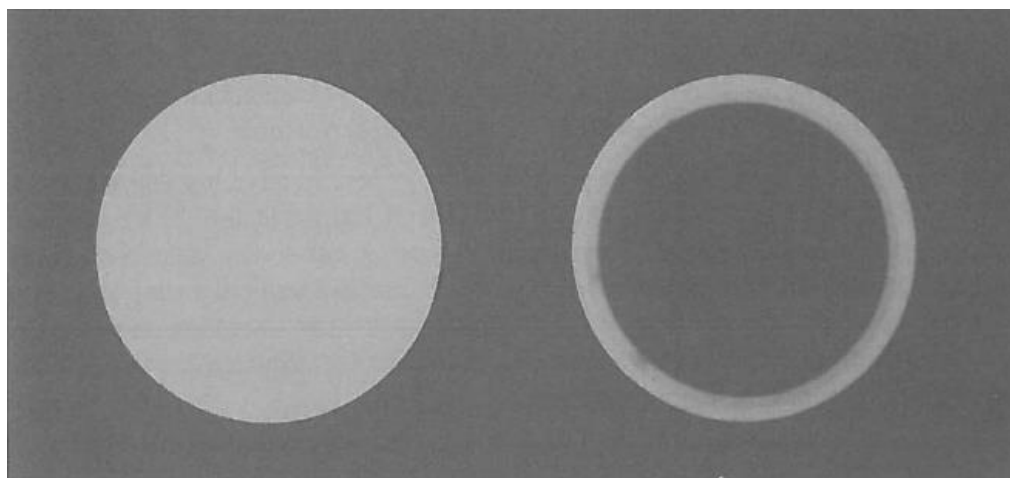
2.3 Tribodiagnostika

Tribodiagnostika (dále jen TTD) je obor, zabývající se mazivy, mazacím zařízením a pracovními postupy mazání. Většinou se v praxi pravidelně sleduje stav maziva, zda je v pořádku, funguje-li těsnění a zda je dostatečná hladina oleje. TTD se dělí na dvě části. První je diagnostika oleje, kdy se sledují změny ve vlastnostech a složení provozních kapalin, druhá je diagnostika zařízení, při které se sleduje intenzita opotřebení. [12]

V rámci tribodiagnostiky oleje se sleduje velké množství charakteristických vlastností. Následující parametry provozních kapalin jsou výběrem nejvýznamnějších a nejčastěji měřených veličin. [12]

Základní vlastností oleje je viskozita, kde se pro potřeby TTD měří kinematická viskozita. Dynamická se měří, pokud je potřeba zjistit vlastnosti oleje v záporných teplotách. Ze znalosti viskozity oleje při 40° a 100° lze zjistit viskozitní index, který udává závislost změn oleje na teplotě. Především u motorových olejů se měří bod vzplanutí, přičemž zároveň zjistíme obsah paliva v oleji. [12]

Důležitou hodnotou je obsah nečistot, který může způsobit havárie a poruchy stroje. Tyto nečistoty jsou hlavně kovový prach. Pro diagnostiku se užívají membránové filtry (viz obr. 6) a odstředivky s přetížením až 10 000 g. [12]



Obr. 6) Čistý (vlevo) a zanesený (vpravo) membránový filtr [12]

Jednou z nejméně žádoucích látek v olejích je voda, je třeba tedy měřit obsah vody. Ta se do oleje může dostat netěsnostmi chladících systémů nebo kondenzací vzdušné vlhkosti. Do určité hodnoty ji lze tolerovat, avšak při větším podílu je třeba ji odstranit, popřípadě olej vyměnit. V rámci TTD se měří infračervenou spektroskopií, jelikož limity jsou velmi přísné kvůli faktu, že voda naruší izolační vlastnosti oleje. [12]

Pomocí TTD lze, jak již bylo řečeno, sledovat stav stroje. Mazací olej je využíván jako médium pro přenos částic kovů vzniklých opotřebením stroje. Dle obsahu vytipovaných kovů lze předvídat poruchy. Nejčastěji je složení zjišťováno pomocí spektrometrie (absorpční, atomová emisní) a rentgenové fluorescence. Tyto metody určí množství sledovaného prvku a velikost jeho částic. Je-li znám materiál dílu stroje, pak zvýšený výskyt signalizuje opotřebení daného dílu. Například zvýšení mědi signalizuje opotřebení ložisek, výskyt hliníku opotřebení pístů apod. [12]

Při monitorování stavu stroje je důležité sledovat trendy v obsahu nečistot. Diagnostický signál množství nečistot není reprezentován aktuální hodnotou veličiny, ale náhlou změna v jejím trendu. Limitní hodnoty lze hodnotit pouze na základě dlouhodobých zkoušek a nelze je zobecňovat. Závisí na provozních podmínkách. [12]

V rámci proaktivní údržby strojů se užívá tří skupin zkoušek. První pomocí emisní spektrometrie je určení obsahu prvků v kapalinách (otěrové kovy, znečištění kapalin a aditivní prvky). Dále se infračervenou spektrometrií určí produkty degradace kapalin (oxidace, nitrace a sulfatace) a díky pokrokům v technologiích i obsah vody, glykolu a sazí. Třetí zkoušky určují fyzikálně-chemické parametry. U všech kapalin se stanovuje viskozita. [12]

2.4 Termodiagnostika

Termodiagnostika je obor zabývající se měřením teploty pomocí termokamery – takzvané termografie. Termografie je bezdotyková, pasivní měřicí metoda, která výpočtem teploty vytvoří obraz odrážející rozložení povrchové teploty měřeného objektu. Nevýhodou termokamery je neschopnost měřit vnitřní teplotu objektu. Princip termokamery je založen na

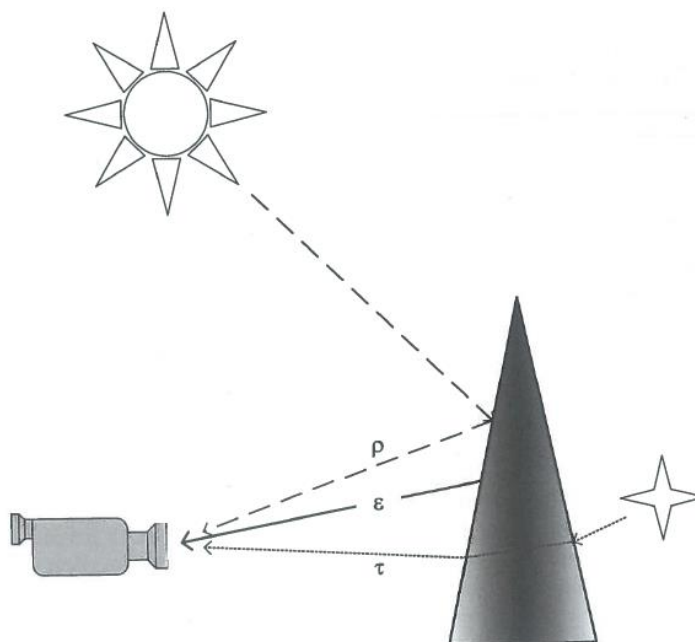
tom, že každý objekt s teplotou vyšší, než je absolutní nula, vydává infračervené záření.[12][15]

Nevýhodou termokamer je řada ovlivňujících faktorů měření, které ale mohou být kompenzovány výpočtem. Tyto faktory mohou být vnější jako například vzdálenost od objektu, relativní vlhkost vzduchu nebo teplota vzduchu. Dále jsou pak faktory, které jsou spojeny s vlastnostmi měřeného objektu. Tyto faktory jsou například schopnost povrchu přijímat a vyzařovat infračervené záření. Tato vlastnost se nazývá emisivita a nabývá hodnot od nuly do jedné. Má-li maximální hodnotu, pak se jedná o černé těleso, které záření neodráží a využívá se ke kalibraci. Dále má objekt vlastnost reflexivity a to je schopnost záření odrážet. Také nabývá hodnot od nuly do jedné. Poslední vlastností je transmisivita, která udává míru prostupnosti infračerveného záření. Pro většinu objektů je nulová, ale může nabývat hodnot do jedné. [15]

Z Kirchhofových zákonů platí (se zanedbáním transmisivity), že suma reflexivity a emisivity je rovna jedné. Tento zákon je třeba aplikovat při měření, jelikož měření přijímá záření o libovolné úrovni intenzity pro výpočet teploty je třeba zohlednit pouze infračervené záření emitované objektem. Z toho plyne, že termokamera musí odečítat složku reflexivity. Podmínkou pro správné měření je tedy zadání správné emisivity nebo reflexivity měřené plochy. [12]

V následujícím obrázku (obr. 7) jsou názorně vyobrazeny emisivita, reflexivita a transmisivita při měření termokamerou. [12][15]

Termodiagnostika je jako diagnostická metoda využívána tam, kde povrchová teplota představuje objektivní diagnostický signál vypovídajícím o stavu zařízení. Může odhalit problémy na motorech, izolacích, čerpadlech, ložiskách apod. [12][15]



Obr. 7) Znázornění emisivity, transmisivity a reflexivity [12]

2.5 Defektoskopie

Defektoskopie, hlavně nedestruktivní, se využívá pro zkoušku materiálu bez jeho znehodnocení. Tyto zkoušky jsou důležité pro popis provozní spolehlivosti. [16]

Pro nedestruktivní defektoskopii existuje řada metod. Každá z metod má své výhody a nevýhody. Žádná není schopná zjistit všechny možné vady. Při kontrole je třeba se zamyslet nad možným charakterem vad a zvolit správnou metodu. [12][16]

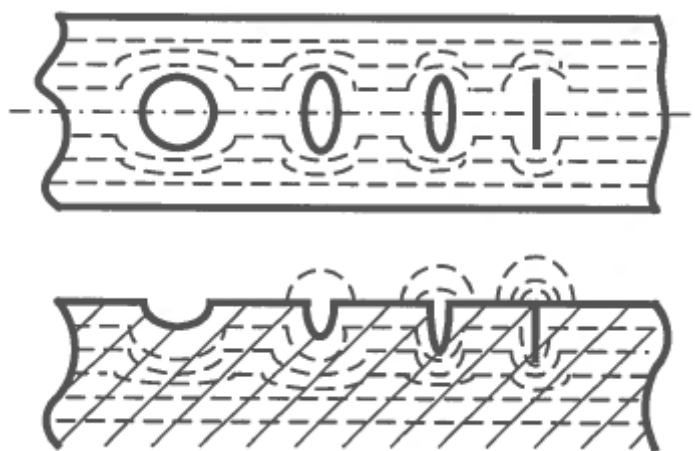
Nejjednodušší metodou je vizuální kontrola. Zkušený pracovník s dobrými zrakovými schopnostmi je schopen odhalit povrchové vady pomocí přímé vizuální kontroly při dostatečném osvětlení a za použití lupy nebo okem. Není-li schopen na povrch dostatečně vidět (např. jedná-li se o vnitřní povrch), je možné použít endoskop a jedná se pak o způsob nepřímý. [12][16]

Druhou metodou je prozařování, kde probíhá interakce mezi ionizujícím zářením a zkoušenou hmotou. Toto záření se zviditelní. Výsledkem je změna intenzity, a tedy zjištění nehomogenit. Prozařování zjišťuje vady v celém objemu materiálu, a právě je vhodné na objemové vady, avšak ne na vady plošné. [16]

Dále lze použít ultrazvukovou metodu, která je stejně jako prozařování objemová metoda. Využívá principu ultrazvukových vln, které se na rozhraní rozdílných prostředí lámou a odráží. Tyto odrazy pak indikují vady. [12]

Pro detekci necelistvostí na povrchu se využívá magnetická metoda a metoda kapilární. Magnetická využívá principu vytvoření rozptylového magnetického toku okolo defektu, který je pomocí indikačního prostředku zvýrazněn. [16]

Jak je vyobrazeno níže, velikost a tvar nehomogenit má přímý vliv na tvar a velikost siločar (viz. obr. 8) [12]



Obr. 8) Vliv tvaru a velikosti siločar na povrchových defektech [12]

Kapilární metoda je pro svou jednoduchost jednou z nejpoužívanějších metod. Aplikuje se penetrant na vyčištěný povrch, který zatéká do necelistvostí otevřených na povrchu. Zbytek penetrantu je očištěn a povrch je překryt vrstvou vývojky, která zvýrazní povrchové defekty, do kterých vtekl penetrant. [12][16]

2.6 Elektrodiagnostika

Elektrodiagnostika je obecně jakákoliv diagnostika elektrického zařízení. Elektrická zařízení se skládají z několika částí. Obsahují část mechanickou, elektrickou, magnetický obvod a elektrický obvod. V technické praxi je nejdůležitější částí právě elektrický obvod, hlavně

jeho izolační stav. Z tohoto důvodu jsou nejdůležitějšími diagnostickými veličinami izolační odpor, polarizační index, ztrátový činitel a kapacita. [17]

Existují i další typy zkoušek. Pro zjištění elektrické pevnosti izolačních materiálů se aplikují napěťové zkoušky, buď se stejnosměrným, střídavým nebo atmosférickým impulsním napětím. [17]

Jako příklad komplexnosti elektrodiagnostiky v praxi lze uvést postup diagnostiky transformátoru. V rámci elektrodiagnostiky je třeba dvanáct různých zkoušek (měření činného odporu, kontrola sledu fází, měření hodinového úhlu, měření převodu, určení polarizačních indexu atd.). Dále je třeba provést diagnostiku oleje, která se skládá z dalších dvanácti zkoušek v rámci tribodiagnostiky. [17]

2.7 Metrologické diagnostické metody

Metrologické diagnostické metody se snaží o posouzení technického stavu stroje s využitím metrologických metod. Je možné je rozdělit na dvě skupiny – přímé a nepřímé. Přímé řeší posouzení technického stavu stroje měřením přímo na stroji. Jedná se například o hodnocení geometrické přesnosti stroje, hodnocení přesnosti a opakovatelnosti nastavení poloh stroje, hodnocení volumetrické přesnosti atd. [10]

Nepřímé metody hodnotí vlastnosti stroje vyhodnocením vzorku – např. jeho kruhovitost, válcovitost, textura povrchu apod. [10]

2.8 Současný stav diagnostických metod výrobních strojů v normách

Dříve byly stroje posuzovány pouze podle norem ČSN EN ISO 230-X s obecným názvem Zásady zkoušek obráběcích strojů. V současné době ovšem vznikají postupy doplňující stávající poznání – například norma ČSN ISO 10791-7 Podmínky zkoušek pro obráběcí centra – Část 8: Vyhodnocení vlastností interpolace ve třech souřadných rovinách, která byla inspirací pro navržení vzorku. [10]

Pro názornost jsou zde vypsány normy řady 230-X a jejich název:

- **ČSN ISO 230-1 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za kvazistatických podmínek**
- **ČSN ISO 230-2 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 2: Určení přesnosti a opakovatelnosti nastavení polohy v číslicově řízených osách**
- **ČSN ISO 230-3 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 3: Určení tepelných vlivů**
- **ČSN ISO 230-4 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů**
- **ČSN ISO 230-5 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 5: Určení emise hluku**
- **ČSN ISO 230-6 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 6: Určení přesnosti nastavení polohy na diagonálách tělesa a stěn (Zkouška diagonálního přestavení)**
- **ČSN ISO 230-7 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 7: Geometrická přesnost os rotace**
- **ČSN ISO 230-10 Zásady zkoušek obráběcích strojů – Část 10: Určení měřících vlastností snímacích systémů číslicově řízených obráběcích strojů**

2.9 Volba diagnostických metod pro diplomovou práci

Při volbě metod pro určení stavu stroje je třeba brát v potaz co na stroji chceme hodnotit a jaké jsou možnosti pro měření.

Jako nejvhodnější řešení pro diplomovou práci byla určena kombinace diagnostiky založené na zkoumání parametrů zkušební vzorku, vibrodiagnostiky a měření volumetrické přesnosti stroje. Tyto metody byly po konzultaci s firmou zvoleny hlavně z důvodu, že pro firmu mají nejvyšší potenciál rozvoje a přínosu. Například vibrační diagnostika a metrologická diagnostika zkušební vzorku dosud nebyly ve firmě Datron řešeny.

Norma pro výrobu zkušební vzorku již existuje, a je podrobně popsána v další kapitole, avšak diplomová práce se zaměřuje na několik vybraných parametrů (různých od normy), a to hlavně tolerance tvaru (kruhovitost a válcovitost) a vybraných rozměrů.[5]

Je provedena také analýza výsledků kruhovitosti v zatíženém stavu, tzn. vyhodnocení kruhovitosti na hotovém zkušebním vzorku, a její porovnání s měřením stroje pomocí systému Ballbar. Na vzorku bude také vyhodnocena textura povrchu. Právě porovnání měření Ballbarem (nezatížený stav) a měření kruhovitosti vzorku (zatížený stav) je nová myšlenka, které se doposud, dle dostupných zdrojů, nikdo nevěnoval.

Jelikož volba multiparametrické diagnostiky pomocí zkušební vzorku odráží okamžitý stav stroje, není vhodné do diagnostického programu zařazovat například tribodiagnostiku a termodiagnostiku. [12]

3 NÁVRH ZKUŠEBNÍHO VZORKU

Posouzení stavu je důležitou součástí zvyšování výkonnosti obráběcích strojů (obráběcí centrum je číslicově řízený stroj, který je schopný provádět množství operací – od frézování, vyvrtávání, vrtání a mnoho dalších dle zvoleného nástroje). Přímé metody posouzení technického stavu většinou využívají speciálních přípravků a zařízení pro zjištění jedné dané vlastnosti. Diagnostika pomocí zkušební vzorku tedy spadá do této kategorie. [5][18]

Normovaný zkušební vzorek je vytvářen za účelem obchodním – jako důkaz při přejímce, kdežto v této kapitole je navržen vzorek pro zjištění technického stavu stroje během provozu.

V této kapitole jsou popsány diagnostikované stroje, normované vzorky, navržený vzorek a v závěru jejich porovnání.

3.1 Diagnostikovaný stroj

Jedná se o CNC frézku M8 CUBE firmy Datron AG (viz. obr. 9). Je doporučena pro obrábění skříněk, čelních panelů a profilů z hliníkových slitin, dále pak je doporučena pro měkké neželezné kovy a kompozitní materiály. Souřadnicový stůl frézky je polymer-betonový stůl s ocelovým základem. Pracovní prostor frézky je o rozměrech 1020 mm x 830 mm x 245 mm. Pohon zajišťují bezkartáčové servopohony a kuličkové šrouby pro každou osu. Využívané vřeteno je vysokofrekvenční s rychlostí až 48 000 otáček za minutu. Rychlosti posuvů jsou až 22 m/min. Ovládání je skrze rozhraní na bázi systému Windows využívající vlastní programovací jazyk a systém. [19]

V kapitole 4.7 je provedeno měření na stroji z provozu. Rozdíl mezi těmito stroji je ve výkonu vřetene. V provozu je stroj se vřetenem o výkonu 2kW, kdežto ve firmě DATRON je k dispozici vřeteno o výkonu 4kW.

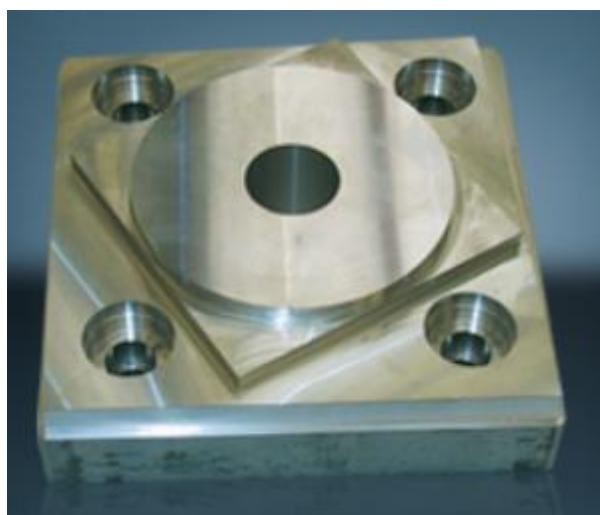


Obr. 9) Datron M8 CUBE [19]

3.2 Normovaný zkušební obrobek

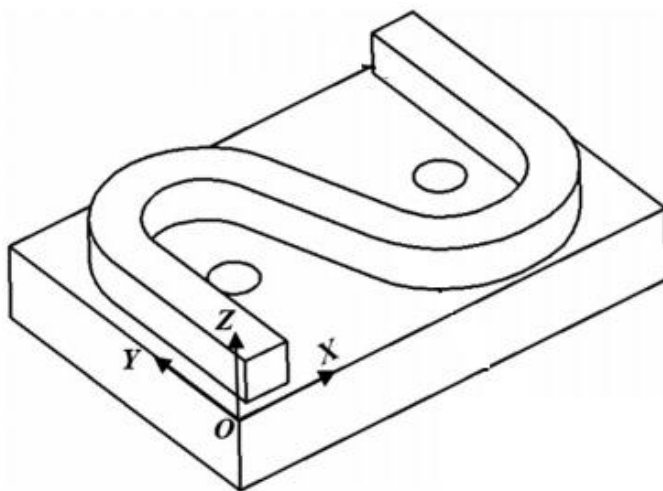
Nepřímou metodou je pak využití zkušební obrobku. Této problematice se věnuje norma ČSN ISO 10791-7. Určuje jak zkoušky obráběním standardizovaných zkušebních vzorků, tak jejich doporučené rozměry. Z těchto rozměrů a požadavků vyplývají nároky na zhodnocení stavu obráběcího stroje. Příklad zkušební obrobku dle normy je níže (viz. obr. 10.).

Samozřejmě norma je doporučením, přeje-li si zákazník nebo uživatel přesnější metody a rozměry, mohou být též provedeny. [5][18]



Obr. 10) Fotka zkušební obrobku typu A [20]

Tvar vzorku může též vypadat jinak než dle normy. Jak je napsáno výše, liší se dle způsobů využití a dle požadavků. Například, posuzujeme pětiosé obráběcí centrum, vykazuje normovaný obrobek několik nedostatků. Textura povrchu je často mimo toleranční mez, když se obrábí komplexnější oblé plochy, a to i přes to, že nástroje a obráběcí centrum byly certifikovány za užití vzorku dle normy. Tyto tvary jsou časté v leteckém průmyslu a je třeba na ně dbát se zvýšeným důrazem na kvalitu. Například Chengdu Aircraft Industry group tedy bylo nuceno vyvinout vlastní obrobek ve tvaru S (viz. obr. 11). [18]



Obr. 11) Alternativní obrobek ve tvaru S [18]

V rámci zkoušek na zkušební obrobky platí, že je třeba zkoušku provádět za podmínek (je-li stroj ustavován) definovaných v normě ISO 230-1. Zkoušky pak mohou být prováděny v libovolném pořadí pro usnadnění montáže. Mohou být prováděny v rozsahu plném nebo například jedná-li se o přejímku, je na uživateli, aby si určil, které zkoušky budou provedeny. Měřicí technika užívaná pro zkoušky by měla být se stejnou přesností jako příklady v normě, avšak číselníkové úchylkoměry musí mít rozlišovací schopnost nejméně 0,001mm.[5]

Existují dva typy obrobků. Obrobky typu A (ISO 10791-7-A 160 a ISO 10791-7-A 320) jsou obrobky o jmenovité velikosti 160 mm a 320 mm a jsou určeny pro nastavení polohy a zkoušky tvarových rozměrů. Obrobky typu B (ISO 10791-7-B 80 a ISO 10791-7-B 160) jsou obrobky o jmenovité velikosti 80mm a 160mm a jsou určeny pro čelní frézování. Tyto obrobky by (není-li dohodnuto jinak) měly být umístěny do střední polohy dráhy souřadnice X a do vhodné polohy pro upnutí v osách Y a Z. Upnuty jsou tak, aby byly co nejstabilnější.[5]

Materiál obrobku záleží na dohodě. Avšak vyplývají z něj řezné podmínky – řezná rychlost pro litinu například by měla být 50 m/min, u hliníku pak 300m/min.[5]

Rozměry zkušební vzorku, který je obráběn několikerým zmenšováním vnějších rozměrů a zvětšováním děr a otvorů, by měl odpovídat rozměrů z normy. Je také možné využít již obrobený obrobek, jeho finální rozměry by se neměly lišit o víc jak 10 % originálu.[5]

Pro účely sledování a organizace se doporučuje mít každý vzorek označený.[5]

3.2.1 Zkušební obrobek typu A

Tato zkouška se skládá z nastavení polohy, následného vrtání pěti děr a několika dokončovacích průchodů na různých profilech. Cílem zkoušky je otestovat chování stroje při různých podmínkách, jako například rozdíl v posuvu v jedné ose nebo interpolaci dvou os, popřípadě kruhové interpolaci.[5]

Rozměry obrobku jsou dány následující tabulkou (viz tab. 2):

Tab 2) Velikosti (v milimetrech) rozměrů zkušební vzorku A [5]

Jmenovitá velikost, <i>l</i>	<i>m</i>	<i>p</i>	<i>q</i>	<i>r</i>
320	280	50	220	100
160	140	30	110	52

Finální obrobek je dle normy výsledkem šesti operací. Ve středu obrobku je vyvrtána díra o průměru *p*. Vnější čtverec má délku strany *l*. Čtverec skloněný pod úhlem 75° má stranu délky *q* a nachází se na vrchní ploše vnějšího čtverce. Kružnice na čelní ploše má průměr o dva milimetry menší, než je rozměr *q*. Skloněné plochy odpovídají tangentě 0,05 (tj. 3°) mající hloubku 6 mm. Poslední jsou 4 vyvrtané díry (26/43 mm dle velikosti obrobku) a čtyři díry (28/45 mm) ve vzdálenosti *r* od střední roviny obrobku.[5]

Předepsány jsou i podmínky obrábění. Řezná rychlost je zmíněná výše a záleží na materiálu, posuv by měl být mezi 0,05mm/zub a 0,1mm/zub. Hloubka řezu je 0,2mm v radiálním směru a ve směru axiálním a 6mm [5]

Pro kompletnost zkoušek je třeba zaznamenat podmínky – materiál a číslo vzorku, materiál a rozměr nástroje, řezná rychlost, posuv, hloubka řezu a zvolená míra skloněných ploch.[5]

3.2.2 Zkušební obrobek typu B

Pomocí zkušebního obrobku typu B se ověřuje rovinnost obrobenej plochy ve dvou řezech, které se překrývají o 20% průměru frézy. Šířka plochy zkušebního obrobku je dána závislostí na průměru nástroje tabulkou (viz tab. 3) tak aby zachovala poměr 1:1,6.[5]

Tab 3) Rozměr zkušebního obrobku B [5]

Šířka plochy W mm	Délka plochy L mm	Šířka řezu w mm	Průměr frézy mm	Počet zubů
80	100 až 130	40	50	4
160	200 až 250	80	100	8

Je využita čelní fréza s vyměnitelnými břitovými destičkami. Hloubka řezu by neměla přesáhnout 0,5 mm. Polotovár musí mít možnost k upnutí na stůl nebo přípravek. Nástroj by měl mít radiální házení menší než 0,02 mm a čelní menší než 0,03 mm. Úchylka rovinnosti by neměla přesáhnout 0,02 mm u menšího a 0,03 mm u většího vzorku.[5]

Podobně jak u zkušebního vzorku A jsou všechny potřebné informace zaznamenány.[5]

3.3 Návrh zkušebního vzorku

Jelikož se diplomová práce zaměřuje v rámci multiparametrické diagnostiky především na kruhovitost, válcovitost a texturu povrchu, odvíjí se od toho i přizpůsobení tvaru a rozměrů zkušebního vzorku. Tyto parametry byly zvoleny také z důvodu možností kontroly a změření na dostupných přístrojích fakulty.

Polotovár, z něhož zkušební vzorek vychází, je jednoduchý válec z duralu. Po dohodě s vedením firmy Datron bylo rozhodnuto, že bude vzorek obsahovat následující prvky. Z čela zahloubení s přesným vnějším a vnitřním průměrem. Vně zahloubení budou vyfrézovány tři kapsy – dvě obdélníkové a jedna kruhová.

Výrobní výkres zkušebního vzorku je dostupný v přiloženém výkrese, stejně tak jako programy (Příloha 3 a Příloha 4). Tento výkres je pouze se specifikacemi rozměrů. Až následně po vyhodnocení vzorků byly předepsány parametry textury na finální výkres (viz kapitola 4.4.7).

Na přiloženém výkrese jsou také předepsány některé geometrické tolerance. Vnitřní a vnější průměr a kruhová kapsa jsou tolerovány pomocí kruhovitosti s hodnotou 0,02mm. Kruhová kapsa má také tolerovanou polohu vůči základně A – vnějšímu průměru. Dále je tolerovaný tvar plochy obdélníkových kapes včetně parametru UF (United feature). Délkové rozměry nejsou tolerované.

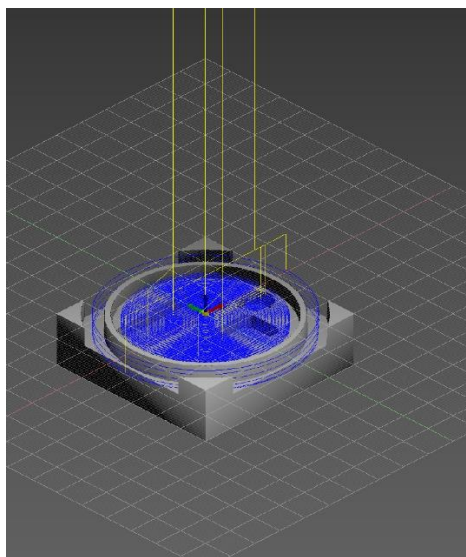
Tolerance obdélníkových kapes a malé kruhové kapsy jsou na výkrese předepsány z důvodu upřesnění pro výrobu, avšak po konzultaci s vedením firmy nebyly pro práci vybrány jako klíčové. Práce se zaměřila na vnitřní průměr, vnější průměr a texturu povrchu.

3.3.1 Výroba zkušebního vzorku a návrh parametrů obrábění

Parametry, při kterých byl vzorek obroben jsou následující. Otáčky jsou stanoveny na 37000 rpm. Tato hodnota byla zvolena jako cca 90 % maximální hodnoty (požadavek od zadavatele). Rychlost posuvu při hrubování je 2000 mm/min, u dokončování také 2000 mm/min a u rampování 1000 mm/min.

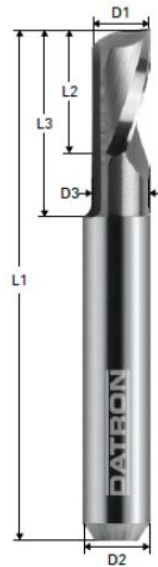
Předchozí odstavec popisuje program pro první tři vzorky. Pro vzorky 4 a 5 byl po dohodě s vedením Datronu vytvořený nový program. Nový program obrábí při 38000 rpm a posuvy jsou jak pro hrubování, tak pro dokončování a rampování 5000 mm/min. Dalším rozdílem je obrábění vnějšího průměru, kdy místo obrábění po spirále (u prvního programu) byla zvolena metoda postupného obrábění v několika krocích, kdy je při jednom kroku obroben průměr vždy při konstantní hodnotě v ose Z.

Dráhy obrábění jsou vytvořeny pomocí softwaru CNC frézky a jsou zobrazeny v obrázku níže (viz. obr. 12). Je zde vidět, že je obrobena pouze malá část polotovaru.



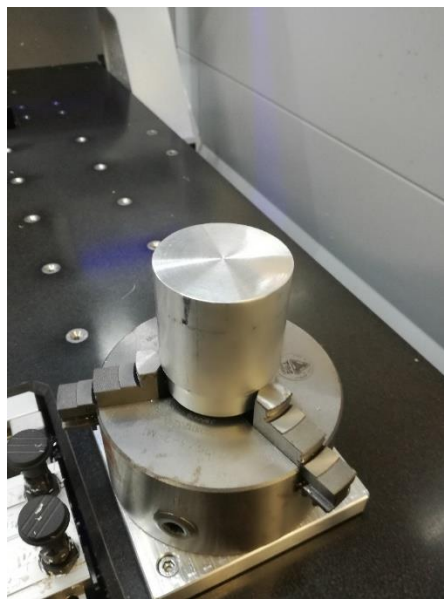
Obr. 12) Dráhy frézování zkušebního vzorku

Na frézování je využita fréza Datron Single Flute End Mill 068086E. Pro vzorek je využita pro dosažení nejlepších podmínek vždy nová fréza. O rozměrech $D1=6$ mm, $D2=6$ mm, $D3=5.5$ mm, $L1=50$ mm, $L2=10.5$ mm a $L3=16.5$ mm (viz. obr. 13). Pro doplnění, cena jedné této frézy se pohybuje od 29 do 33 eur, dle velikosti objednávky. Tato fréza je vhodná pro frézování hliníkových slitin, dřeva, plastu a měkkých kovů (měď, bronz). V porovnání s frézou danou normou je znatelný rozdíl v její velikosti. Místo až 100 mm průměru frézy je využita fréza s průměrem 6 mm. Vzorek byl uchycen v pravé části stolu. [5][21]



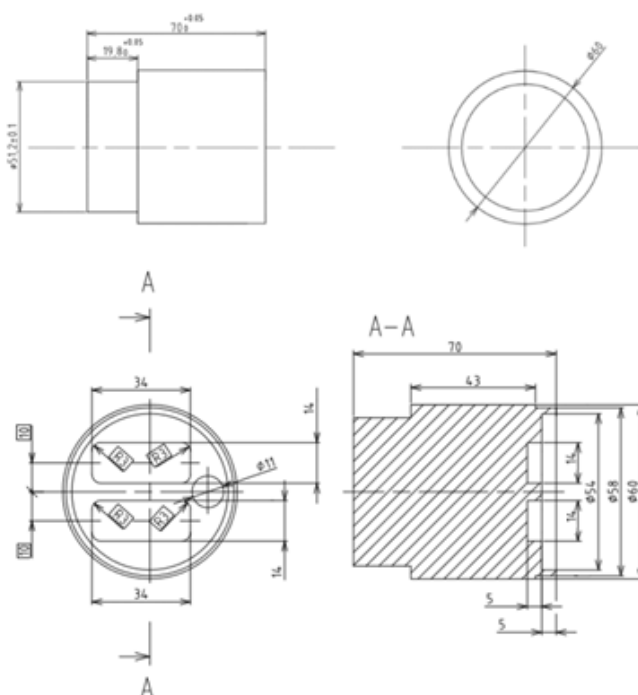
Obr. 13) Fréza využitá pro obrábění [21]

Na následující fotografii (viz. obr. 14) je zobrazen polotovár připravený pro frézování.



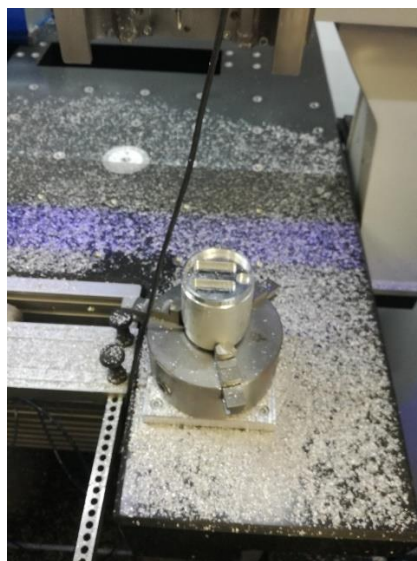
Obr. 14) Polotovár zkušebního vzorku

Na obr. 15 jsou znázorněny rozměry polotovaru a rozměry obráběných ploch bez uvádění geometrického tolerování. Toto tolerování je předmětem vyhodnocení a závěru níže.



Obr. 15) Náčrt návrhu polotovaru (nahore) a obráběných ploch (dole)

Na obrázku 16 lze vidět zkušební vzorek ihned po obrobení.



Obr. 16) Zkušební vzorek po obrobení

3.3.2 Značení vzorků

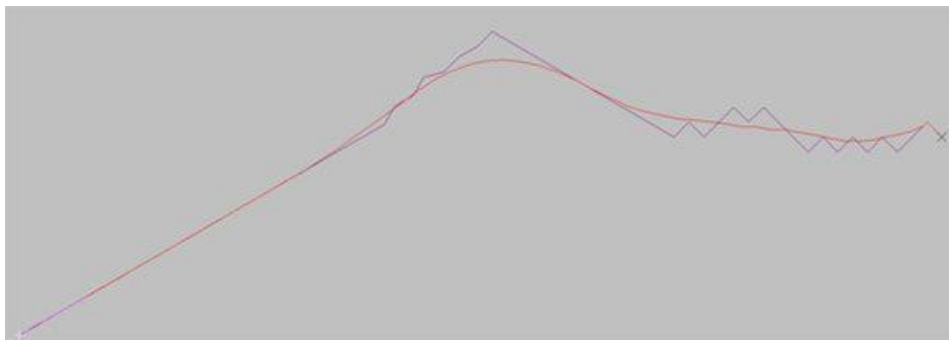
Vyhodnocení je prováděno na pěti vzorcích (dále v textu jen vzorek 1-5, popř. označení VZOREK1-5 při vyhodnocení. První vzorek, je obrobený bez jakýchkoliv zásahů do stroje na začátku vytváření diplomové práce.

Následující vzorek 2, je vzorek vytvořený po opravě softwaru po diagnostikování chyb (viz. kapitola 4.2.3). Poslední vzorek je označen vzorek 3, ten je obroben při stejném nastavení a ve stejné verzi softwaru jako vzorek 2, avšak s využitím softwarového vyhlazení.

Poslední dva vzorky jsou vzorek 4, který byl obroben na stroji M8 Cube s 2kW vřetenem ve firmě EMCO Case a.s a vzorek 5, vytvořený opět ve firmě Datron na 4kW vřetenem, avšak se stejným programem jako vzorek 4.

3.3.3 Softwarové vyhlazení

Softwarové vyhlazení funguje na principu interpolace bodů při CNC obrábění. Tento princip je zobrazen na obrázku 17.[22]



Obr. 17) Softwarové vyhlazení [22]

Červená křivka znázorňuje vyhlazenou konturu, fialovou je znázorněna původní. Výhodou této funkce není pouze vyhlazená, a tedy i teoreticky lepší textura povrchu, ale i zkrácení doby obrábění, jelikož stroj nemusí tolik zpomalovat při pohybu po oblouku.[22]

3.4 Rozdíly vzorků

Diplomová práce využívá jiný typ vzorku, než je doporučený normou. Důvodem jsou dostupnost měřicí techniky pro vyhodnocení a požadavky výrobce frézky. Na zkušebním vzorku daném normou se také vyskytuje parametr kruhovitosti, avšak v diplomové práci byla vyhodnocena i válcovitost.[5]

Dále je k dispozici interferometr Talysurf CCI k vyhodnocování textury povrchu (včetně plošné), tedy jeden z hlavních zkoumaných parametrů bude textura povrchu, která na vzorku daném normou vůbec není zmíněná.[5]

Navržený vzorek se nesoustředí na délkové rozměry a úhly na rozdíl od normového.[5]

4 APLIKACE ZVOLENÝCH DIAGNOSTICKÝCH METOD

V následující kapitole jsou podrobně popsány vybrané metody využity v této diplomové práci. V současnosti se stav předávaného stroje kontroluje pouze kruhovou interpolací. Myšlenkou předložené diplomové práce je vyhodnocení stavu stroje pomocí metrologických charakteristik navrženého vzorku, tedy hledání charakteristik, které by byly využity jako vhodný diagnostický signál, pro účel technické diagnostiky. [26]

V kapitole 4.1 je popsán současný způsob kontroly strojů při předávání zákazníkovi, tedy pouze pomocí měření kruhové interpolace. Výrobce využívá měření kruhové interpolace pouze s jedním rozměrem Ballbaru (100 mm), avšak v diplomové práci jsou porovnány i většími (150 mm a 300 mm). V následujících kapitolách jsou popsána měření provedena za účelem zjištění vhodných parametrů a charakteristik pro aplikaci v metrologické diagnostice. Kapitola 4.2 se věnuje měření vyhodnocení kruhovitosti a válcovitosti a následně je v kapitole 4.3 provedeno porovnání výsledků kapitol 4.1 a 4.2. Toto vyhodnocení bylo provedeno za účelem porovnání kruhové interpolace v zatíženém a nezatíženém stavu.

Následně v kapitole 4.4 je pomocí metod plošné a profilové vyhodnocena textura povrchu. Z tohoto vyhodnocení jsou vyvozena doporučení pro technickou diagnostiku. Byly vybrány parametry, které lze využít jako diagnostický signál.

V kapitole 4.5 je provedeno měření délkových rozměrů souřadnicovým měřicím strojem.

V závěru kapitoly 4–v části 4.6 je přiblížen moderní přístup k měření a vyhodnocení parametrů z kapitol 4.2 až 4.5. Tato měření byly všechny s využitím optických metod ve spolupráci přímo s výrobcí těchto zařízení.

4.1 Měření přesnosti kruhové interpolace

Přesnost obráběcích strojů lze rozdělit na několik podoblastí. Jedná se o geometrickou přesnost, přesnost polohování, přesnost interpolace, volumetrickou přesnost, pracovní přesnost a teplotní dilataci. [23]

Jiným přístupem ji lze rozdělit na přesnost geometrickou, pracovní a výrobní. Geometrická přesnost je závislá na kvalitě konstrukce a na výrobě jednotlivých komponent a jejich seřazení. Pracovní přesnost se vztahuje k posouzení kvality stroje vzhledem k výrobním režimům (definované podmínky) při výrobě zkušební vzorku. Výrobní přesnost se váže k celkové výrobě a její stabilitě u zákazníka. [10]

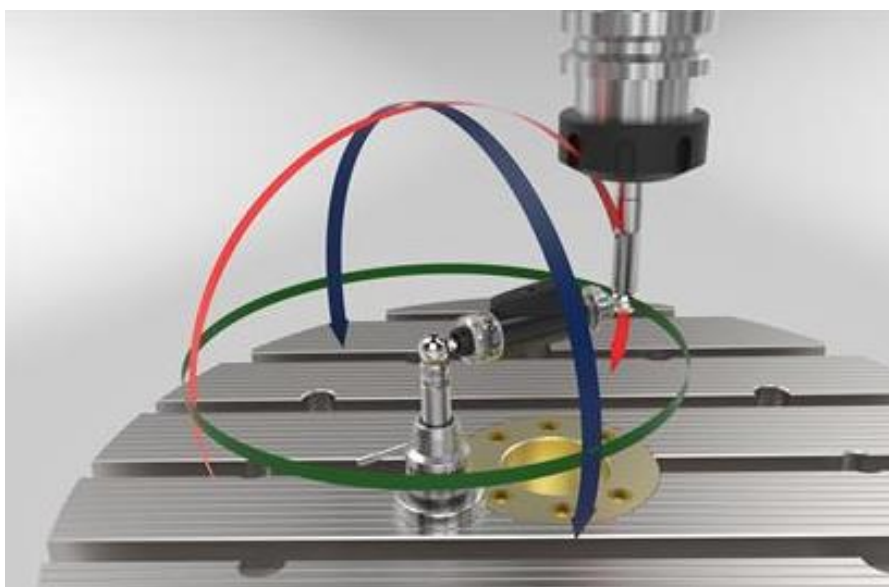
Při hodnocení přesnosti je chyba charakterizována jako odchylka skutečné polohy mezi obrobkem a nástrojem. Existují dynamické (závisí na podmínkách obrábění) a kvazistatické chyby (týkající se struktury obráběcího stroje). Dle prof. Rameshe je podíl kvazistatické chyby 60–70 % na celkové pracovní přesnosti stroje. [10][23]

Diplomová práce využívá měření přesnosti kruhové interpolace. Teoreticky, naprogramuje-li se CNC k tomu, aby opsalo kruhovou dráhu a zařízení by bylo bez chyb, pak by se naprogramovaná a reálně opsaná kružnice shodovaly. Ve skutečnosti je třeba počítat

s několika ostatními faktory – geometrií stroje, systémem řízení a opotřebením. Uvažujeme-li tyto vlivy, pak reálná podoba kružnice se bude od teoretické odlišovat. [10][23]

Účelem zkoušek je poskytnout odhad vlastností tvorby obrysu číslicově řízeného obráběcího stroje. Tyto chyby jsou ovlivněny chováním stroje a geometrickými chybami. Jsou-li ideální podmínky obrábění a poloměr a posuv je totožný při obrábění jako při měření, pak by měly být chyby vidět na vzorku. Z toho plyne, že využitý poloměr Ballbaru byl zvolen takový, s co nejbližším průměrem k vzorku. Ideálními vlastnostmi rozumíme teplotu 20 °C, plně funkční a ohřátý stroj. [23]

Pro zjištění odchylky skutečné polohy mezi vzorkem a nástrojem se využívá zařízení Ballbar QC20-W (dále jen Ballbar, viz. obr. 18). Jedná se o přesný teleskopický lineární snímač se dvěma přesnými koulemi na obou koncích. Ty jsou připojeny k přesným magnetickým držákům, které jsou následně přichyceny jeden ke stolu a druhý k vřetenu. Nasnímaná data jsou odesílána do počítače, kde jsou pomocí softwaru Renishaw Ballbar 5 (dále jen software Renishaw) jsou vypočítány hodnoty polohové přesnosti (kruhovitosti). Na základě těchto hodnot jsou vytvořeny protokoly o měření. [24]



Obr. 18) Ballbar s naznačeným systémem hodnocení kruhové interpolace ve všech osách [25]

Pomocí algoritmů poskytnutými softwarem lze zjistit hodnoty patnácti polohovacích chyb stroje. Ty jsou následně uspořádány dle významnosti společně s hodnotami chyby. [23]

Kruhová dráha je ovlivněna pohybem dvou os, které jsou zatíženy geometrickou odchylkou jako například jejich kolmostmi, nebo odchylkami pohonů (zpoždění serva) a odchylkami číslicového řízení. [23]

Příklad geometrické chyby je již zmíněná kolmost os. Ta se projevuje vznikem elipsy místo kruhové dráhy se skloněním os o cca 45°. Příkladem odchylky pohonů je backlash neboli chyba axiální vůle, která se v grafu znázorní schodem v bodech reverzace. [23]

Měření kruhové interpolace bylo provedeno ihned po obrobení zkušebního vzorku.

Parametry Ballbaru jsou v následující tabulce (tab. 4).

Tab 4) Parametry systému Ballbar [10]

Parametr	Hodnota
Rozlišení snímače	0,1 μm
Přesnost měření	$\pm (0,7 + 0,3L) \mu\text{m}$
Provozní teplota	0 až 40 °C
Max. rychlost snímání	1 000 Hz
Rozsah měření	$\pm 1 \text{ mm}$
Rozsahy průměrů měření	100 – 1 000 mm

4.1.1 Vyhodnocení měření kruhové interpolace

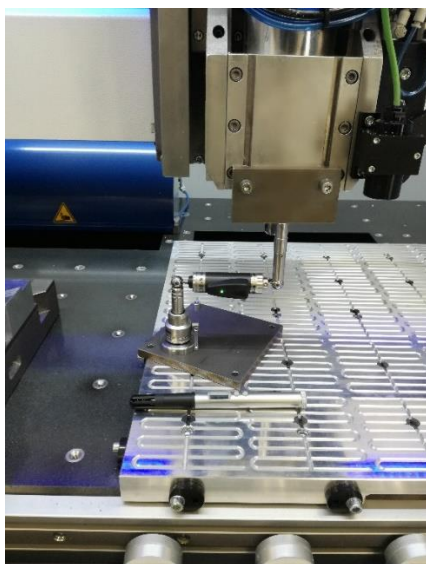
Měření kruhové interpolace, jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, bylo provedeno ihned po obrobení zkušební vzorku. Byl použit Ballbar o poloměru 100 mm, jelikož je to nejbližší dostupný rozměr k vzorku a pro porovnání i Ballbary o poloměrech 150 mm a 300 mm. Posuv byl nastaven na 2000 mm/min a tato hodnota byla použita i pro měření interpolace. Běhy byly uspořádány dle základního nastavení Renishaw, nejprve proti směru hodinových ručiček, následně po směru. Vzorkovací frekvence byla 76,923Hz. [23][26]

Před měřením byl Ballbar kalibrován pomocí přípravku poskytnutým firmou Renishaw. Způsob kalibrace je znázorněn níže (viz. obr. 19). [10]



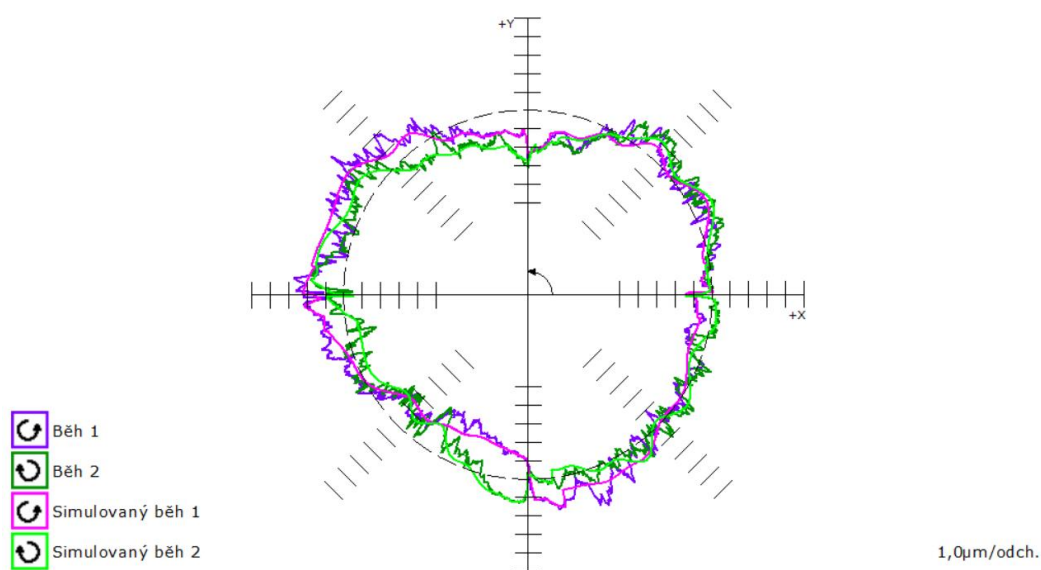
Obr. 19) Kalibrace ballbaru

Jak vypadalo vlastní měření Ballbarem je znázorněno na fotografii (obr. 20). Všechna data byla přenášena bezdrátově pomocí rozhraní Bluetooth do počítače, kde byly následně vyhodnoceny.



Obr. 20) Průběh měření Ballbarem

Výstupem měření je grafické znázornění odchylek od ideálního tvaru při dvou reálných bžích (Bžh 1 a Bžh 2 viz. obr. 21). Následně jsou určeny hodnoty všech chyb a z výsledků jsou nasimulovány dva chody. [27]



Obr. 21) Výstup z vyhodnocení kruhové interpolace na stroji Datron M8 Cube pomocí Ballbaru 100 mm [27]

Jako základní výstup a pro rychlé vyhodnocení je možné se dívat na výsledné hodnoty tolerance polohy, nejlepší poloměr a kruhovitost. Výsledky ze stroje M8 Cube ve firmě Datron při měření Ballbarem 100 mm jsou v následujícím obrázku (obr. 22). [27]

Tolerance polohy 11,0μm
Nejlepší poloměr 100,0008mm
Kruhovitost 6,1μm

Obr. 22) Výsledné hodnoty měření v nezátíženém stavu [27]

Tolerance polohy může být přímo použita a mít vztah k toleranci polohy vyjádřené na výkrese a lze ji využít k odhadu, zda je možné danou součást vyrábět. Tolerance polohy započítává chyby axiální vůle, boční vůle, cyklické chyby, chyby přímosti, chyby měřítka a chyby kolmosti. Tolerance polohy může být vypočtena pouze byl-li Ballbar kalibrován. [26][27] Hodnota tolerance polohy v nezátíženém stavu je 11,0μm.

Nejlepším poloměrem ve vyhodnocení rozumíme ideální kruh, který prochází snímanými daty. Střed kruhu pak určuje střed odchylek dat. [27]

Pro porovnání s dalšími dílčími výsledky diplomové práce je nejdůležitější hodnota kruhovitosti. Ta byla v nezátíženém stavu vypočtena na 6,1μm. Kruhovitost software definuje jako rozdíl mezi největší a nejmenší odchylkou zaznamenaných Ballbarem. [27]

Software je schopen vyhodnotit jednotlivé chyby, simulací zjistí, jaký je jejich příspěvek k odchylce tvaru. Tyto chyby a příspěvky jsou zpracovány z výstupů do tabulky č. 5. [27]

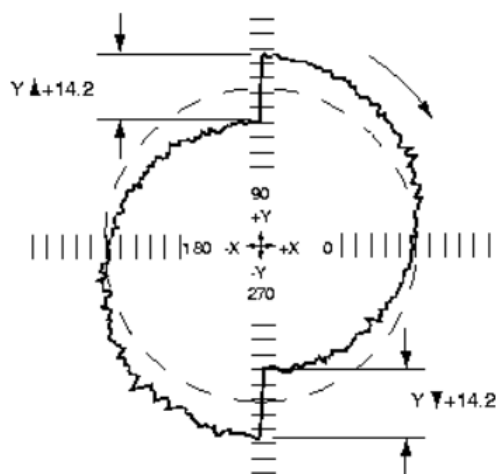
Tab 5) Podíl chyb k celkové odchylce tvaru [27]

Chyba	Příspěvek [μm]	Relativní příspěvek
Mrtvý chod X	0,6	6%
Mrtvý chod Y	1,6	14%
Zpoždění serva X	1,1	10%
Zpoždění serva Y	0,8	7%
Příčná vůle X	0,3	3%
Příčná vůle Y	0,3	3%
Amplituda cyklické chyby X	1,2	10%
Amplituda cyklické chyby Y	0,7	6%
Neshoda serva	0	0%
Kolmost	0,7	7%
Přímochařost X	1,4	12%
Přímochařost Y	1,2	11%
Relativní chyba odměřování	1,3	11%

V následujících odstavcích jsou popsány chyby, které tvoří nejvyšší příspěvek k odchylce tvaru. Tyto chyby jsou mrtvý chod, zpoždění serva, amplituda cyklické chyby a chyba přímochařosti. [27]

Mrtvý chod je označení pro axiální vůli v mechanismech pohybu. Tato vůle se vyskytuje v pohonu stroje – konkrétně pohybem volného konce kuličkového šroubu nebo opotřebenou pohybovou maticí. Tato vůle způsobí prodlevu ve změně směru. Charakteristická axiální vůle je vyobrazena na obr. 23. Je-li axiální vůle nesymetrická, pak je příčinou kroucení šroubu nadměrným namáháním. [26][27]

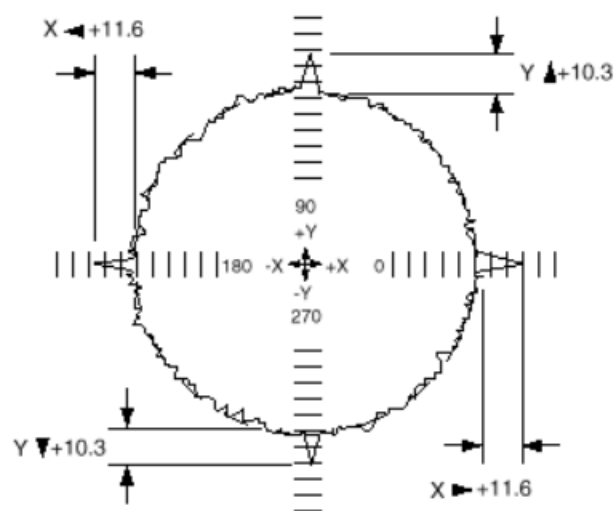
Vypočtená axiální vůle je $0.6\mu\text{m}$ v ose X a $1.6\mu\text{m}$ v ose Y. Relativní příspěvek je celkem 22%.



Obr. 23) Charakteristické vyobrazení axiální vůle [27]

Při změně pohybu osy v jednom směru a obratu do opačného směru je možné, že místo plynulé změny chodu dojde ke zpoždění. Důvodem ke vzniku této chyby může být nepřiměřený točivý moment vytvářející třecí sílu, doba odezvy servosystému nebo nevhodná kompenzace axiální vůle. [27]

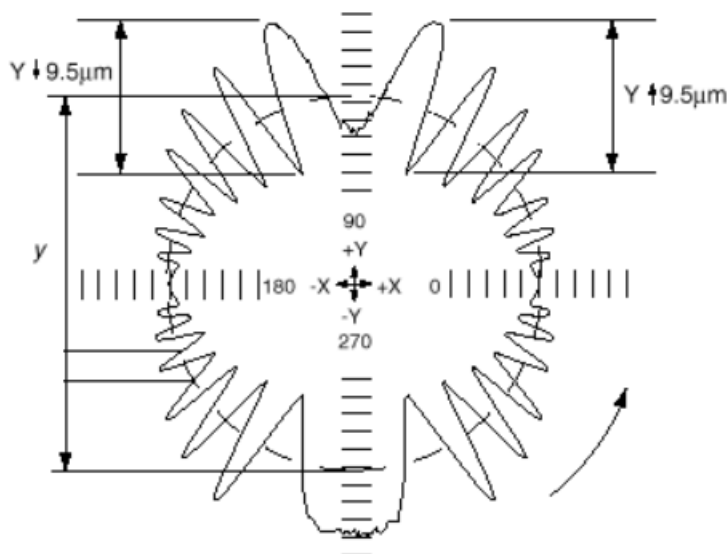
Hodnoty zpoždění jsou v ose X $1,1\mu\text{m}$ a v ose Y $0,8\mu\text{m}$. Celkový relativní příspěvek je 17% a příklad znázornění teoretické chyby je na obr. 24.



Obr. 24) Charakteristické vyobrazení zpoždění serva [27]

Cyklická chyba je sinusová chyba, jejíž frekvence a amplituda se v grafu mění. Je třeba tedy určit kde a jak se mění. Může být způsobena excentricitou upnutí odměřovacího systému, excentricitou kuličkového šroubu, nerovnoměrným stoupáním závitu kuličkového šroubu nebo chybně namontovaným odměřovacím systémem. Příklad teoretické cyklické chyby je znázorněn v obrázku 25. [26][27]

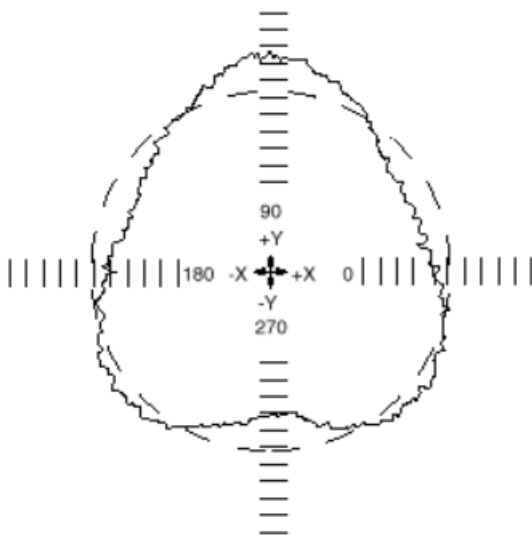
Konkrétní příspěvek její amplitudy v našem měření byl v ose X $1,2\mu\text{m}$ a v ose Y $0,7\mu\text{m}$, relativně tedy 16%.



Obr. 25) Cyklická chyba [27]

Další chybou je přímočarost. Ta je způsobena nedostatečnou přímostí vedení stroje, ať už z důvodu celkové nevyrovnanosti nebo lokálnímu prohnutí. Příčinou těchto vad můžou být opotřebení, havárie a nedostatečné základy stroje. Charakteristickým znakem přímočarosti je vytvoření trojlaločného obrazce (příklad viz. obr. 26). [27]

Příspěvek k odchylce tvaru je $1,2\mu\text{m}$ a $1,4\mu\text{m}$ v osách X a Y respektive. Relativní podíl je celkem 23 %.



Obr. 26) Příklad trojlaločného obrazec v důsledku chyby přímočarosti [27]

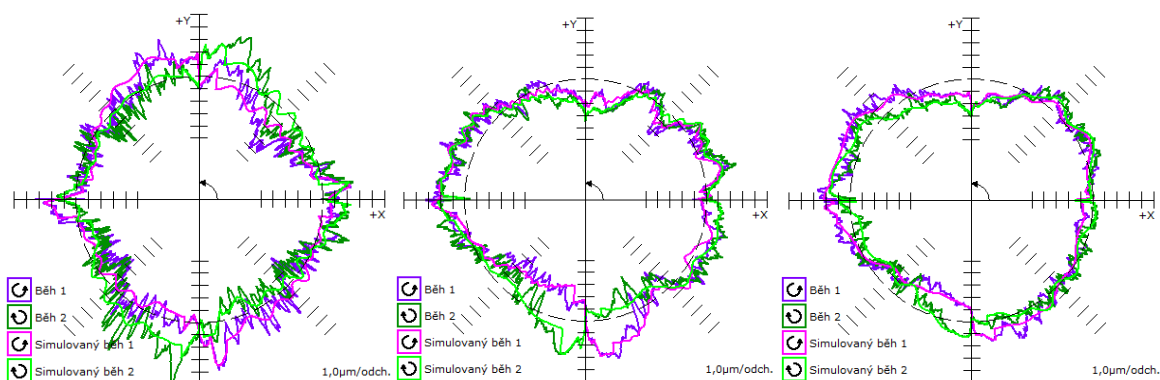
Ostatní chyby mají menší podíl na odchylce tvaru, popřípadě nejsou do vyhodnocení započteny. Seznam všech chyb s hodnotami a celkový výstup je vidět na obr. 27. [27]

Chyba	Hodnota	
Mrtvý chod X	► 0,3	◄ 0,6µm
Mrtvý chod Y	◄ 0,3	► 1,6µm
Zpoždění serva X	► -1,1	◄ 1,0µm
Zpoždění serva Y	◄ -0,8	► -0,2µm
Příčná vůle X	► 0,6	◄ -0,7µm
Příčná vůle Y	◄ -0,1	► 0,5µm
Amplituda cyklické chyby X	↑ 0,7	↓ 1,2µm
Amplituda cyklické chyby Y	↑ 0,6	↓ 0,8µm
Neshoda serva	0,00ms	
Kolmost	7,4µm/m	
Přímochařost X	2,8µm	
Přímochařost Y	2,4µm	
Relativní chyba odměřování	2,6µm	
Chyba odměřování osy X	14,2ppm	
Chyba odměřování osy Y	1,3ppm	
Délka vlny cyklické chyby X	22,5000mm	
Délka vlny cyklické chyby Y	35,0000mm	
Vypočtený posuv	1990,3mm/min	
Chyba středění X	2,1µm	
Chyba středění Y	-8,7µm	
Tolerance polohy	11,0µm	
Nejlepší poloměr	100,0008mm	
Kruhovitost	6,1µm	

Obr. 27) Výsledný protokol měření odchylky interpolace [27]

4.1.2 Rozšířené měření kruhové interpolace

Následně byly porovnány, také testy se systémem Ballbar o průměru 150 mm a 300 mm (viz. tabulka 6) s testem využívající průměr 100 mm (viz. obr. 28). Tyto testy jsou provedeny na jiném stroji, za účelem zobrazení vlivu průměru Ballbaru na měřené parametry.[10]



Obr. 28) Porovnání všech tří testů (300/150/100 mm)

Tab 6) Porovnání výsledků měření systémem Ballbar [10]

	TEST 300	TEST 150	TEST 100
Kruhovitost [μm]	9,3	7,1	6,1
Tolerance polohy [μm]	8,6	13,9	11,0
Kolmost [$\mu\text{m} / \text{m}$]	1,7	6,7	7,4
Přímočarost X [μm]	-1,0	2,2	2,8
Přímočarost Y [μm]	-1,6	0,7	2,4
Relativní chyba odměřování [μm]	-2,3	4,7	2,6
Chyba odměřování X [ppm]	-2,9	2,9	14,2
Chyba odměřování Y [ppm]	0,8	-12,8	1,3
Mrtvý chod X [μm]	0,6 / 1,5	0,1 / -0,3	0,3 / 0,6
Mrtvý chod Y [μm]	2,1 / 2,4	-0,3 / 3,2	0,3 / 1,6
Zpoždění serva X [μm]	0,4 / 0,9	-1,2 / -0,3	-1,1 / 1,0
Zpoždění serva Y [μm]	-1,5 / -1,9	0 / -1,6	-0,8 / -0,2
Příčná vůle X [μm]	-0,2 / 0,5	1,5 / -1,3	0,6 / -0,7
Příčná vůle Y [μm]	0,5 / -0,5	-1,6 / 0,1	-0,1 / 0,5
Amplituda cyklické chyby X [μm]	0,5 / 0,9	0,4 / 0,8	0,7 / 1,2
Amplituda cyklické chyby Y [μm]	1,1 / 1,3	2,8 / 1,7	0,6 / 0,8
Neshoda serva [ms]	-0,01	0,02	0,00

Dle tab.6 můžeme konstatovat, že v následujících parametrech má stroj poměrně vysoký rozptyl: kruhovitosť (6,1 – 9,3 μm), tolerance polohy (8,6 – 13,9 μm), kolmost (1,7 – 7,4 $\mu\text{m}/\text{m}$), chyba odměřování X (-2,9 – 14,2 ppm) a chyba odměřování Y (- 12,8 – 0,8 ppm). V ose Y je patrná vůle 3,2 μm v nezatíženém stavu. Na druhou stranu servopohony jsou dobře seřizené. [10]

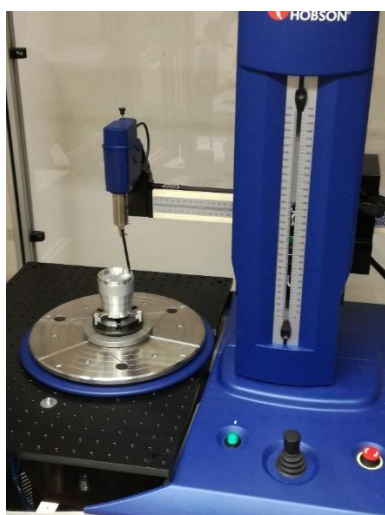
4.2 Kruhovitost a válcovitost

Měření kruhovitosti všech vzorků proběhlo na Českém metrologickém institutu na kruhoměru výrobce Taylor-Hobbsen (viz. obr. 29). Každý vzorek byl změřen stejným postupem. U každého vzorku byla změřena kruhovitosť na vnitřním a vnějším přesně obrobeném průměru v šesti výškách. Z těchto měření je vyhodnocena jak kruhovitosť, tak válcovitost.



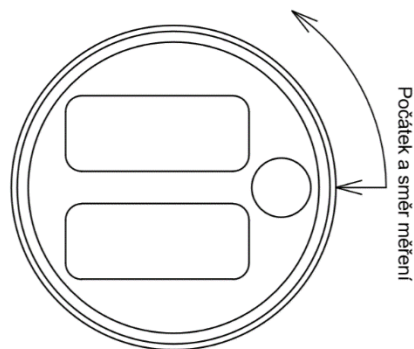
Obr. 29) Kruhoměr Talyrond Tr595S [28]

Příklad uspořádání na měření kruhovitosti vnitřního průměru je znázorněno na fotografii (viz. obr. 30).



Obr. 30) Měření kruhovitosti vnitřního průměru

Pro možnosti porovnání měření bylo třeba zvolit metodiku pro měření. Nejvhodnějším řešením je nastavit vzorek do kruhoměru tak, aby počátek a směr otáčení odpovídali měření Ballbarem. Pro diplomovou práci, a i jako doporučení do budoucna, je zvoleno následující uspořádání (viz. obr. 31):



Obr. 31) Nastavení měření na kruhoměru

4.2.1 Filtrování kruhovitosti a válcovitosti

Výsledky kruhovitosti a válcovitosti jsou zpracovávány pomocí Gaussova filtru 1-150 UPR, jelikož je dán normou pro měřený průměr. Typem reference byla pro všechna vyhodnocení (válcovitost i kruhovitost) kružnice, respektive válec nejmenších čtverců. Vyhodnocované a porovnávané parametry jsou parametr kruhovitosti RONt a válcovitosti CYLt. [29][30]

Všechny vzorky byly před měřením automaticky vyrovnány. [28]

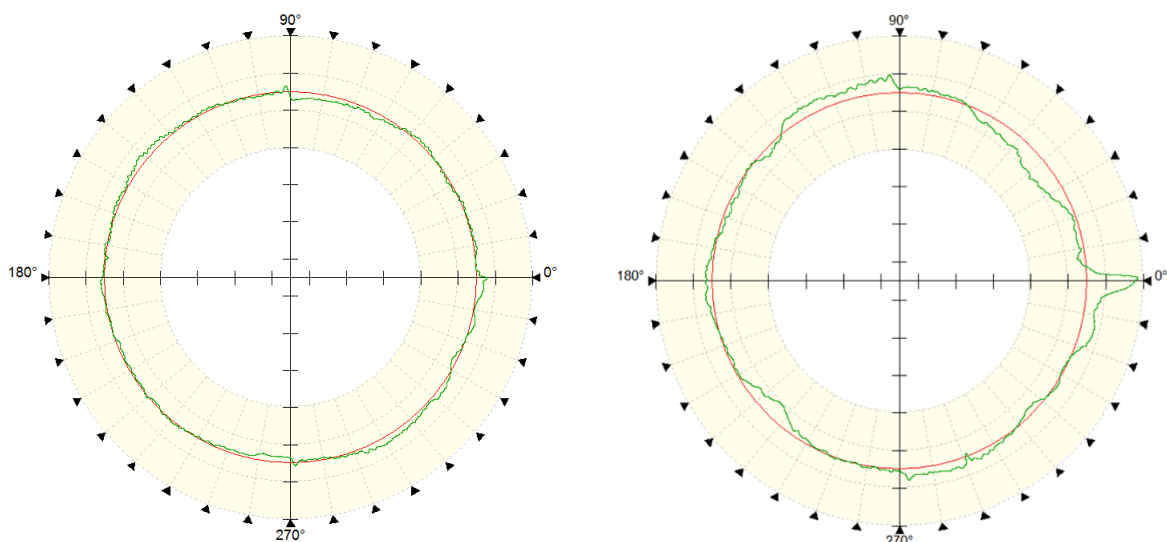
4.2.2 Kruhovitost

Jak již bylo zmíněno, všechny hodnoty RONt jsou vyhodnoceny pomocí referenční kružnice nejmenších čtverců, při Gausově filtru 1-150 UPR. Vyhodnocené hodnoty, včetně průměrných hodnot pro vnitřní průměr, jsou v následující tabulce č. 7 (řádky 1-6 značí šest různých měřených výšek). [30]

Tab 7) Hodnoty RONt vnitřního průměru

Kruhovitost vnitřního průměru RONt			
Měřená výška	Vzorek1 [μm]	Vzorek2 [μm]	Vzorek3 [μm]
1	2,52	2,55	9,18
2	2,62	3,76	9,29
3	2,61	3,21	8,55
4	2,23	3,19	9,81
5	3,04	3,13	9,18
6	2,52	3,45	10,85
Průměr RONt	2,59	3,22	9,48

Zde je vidět, že rozdíl mezi vzorky 1 a 6 byl minimální, avšak vzorek 3 vykazuje několikanásobně vyšší hodnotu RONt. Tento rozdíl je způsobený lokální odchylkou v bodě 0° . Na následujících obrázcích (viz. obr. 32) je vyobrazen rozdíl mezi vzorky 1 a 3. [30]



Obr. 32) Porovnání vnitřní kruhovitosti vzorků 1 (vlevo) a 3 (napravo)

Následně byla vyhodnocena kruhovitosť na vnějším přesném průměru vzorku. Výsledky jsou zpracovány v následující tabulce - č. 8.

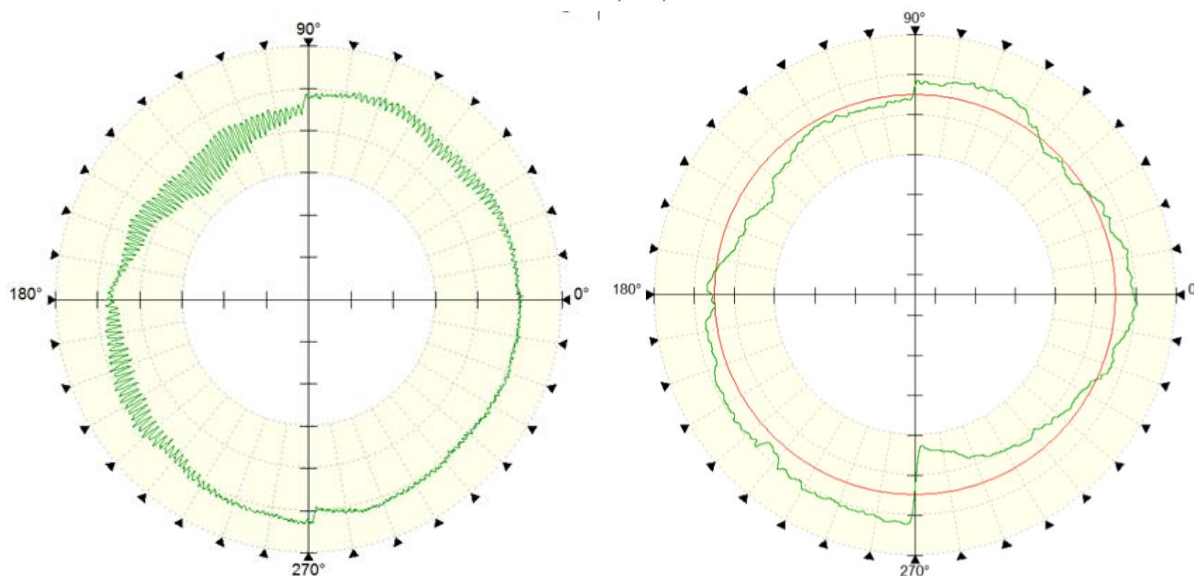
Tab 8) Hodnoty RONT vnějšího průměru

Kruhovitosť vnějšího průměru RONT			
Měřená výška	Vzorek1 [μm]	Vzorek2 [μm]	Vzorek3 [μm]
1	9,27	9,45	9,76
2	9,44	9,92	10,51
3	9,24	10,5	10,82
4	10,45	10,12	10,32
5	9,39	9,62	10,63
6	9,36	10,42	11,15
Průměr RONT	9,53	10,01	10,53

Průměr RONT se od prvního vzorku změnil o 1μm. Avšak po analýze grafického znázornění (viz. obr. 33) odchylek kruhovitosti je zřejmé, že hodnota kruhovitosti má jinou příčinu.

U vzorku 3 je v bodě zvratu v minimu osy Y vidět skok zhruba 10μm, tento skok způsobuje oba extrémy (RONv a RONp) a tudíž i celkovou kruhovitosť. Vycházíme-li z chyb popsaných u měření kruhové interpolace (viz kapitola 4.1.1, odstavec o axiální vůli) můžeme uvažovat, že se jedná o chybu nesymetrické axiální vůle, nejčastěji způsobené kroucením šroubu z důvodu namáhání. [30]

U vzorku 1 (obr. 33 vlevo) je vidět, že zhruba tři čtvrtiny obvodu je „zvlněno“. Tato nesrovnalost je dokonce vidět pouhým okem a jde cítit na dotyk. Vykazuje také podobnou chybu jako vzorek 3, avšak v menší míře.



Obr. 33) Porovnání vnější kruhovitosti vzorků 1 (vlevo) a 3 (vpravo)

4.2.3 Poznámka k vyhodnocení kruhovitosti

Právě zjištění zvlnění povrchu vzorku vedlo ke konzultaci s výrobcem CNC frézky. Český dodavatel kontaktoval německou centrálu, kde zkontrolovali software frézky. Bylo zjištěno, že v softwaru je chyba interpolace. V softwaru jsou přednastaveny cykly pro obrábění vnitřních a vnějších průměrů. Při programování cyklu vnějšího průměru lidskou chybou došlo o posunutí desetinné čárky při zadávání hodnoty kroku interpolace a byla tedy desetinásobně vyšší. Tato chyba se tedy vyskytovala pouze na vnějším průměru. Došlo k opravě softwaru a přehraní na novou verzi, ze které pak vzešli vzorky 2 a 3.

Důležitou poznámkou je zjištění, že grafické znázornění odchylek kruhovitosti je v každém řezu pro jednotlivé vzorky homogenní. Tzn. na daném vzorku a daném průměru se tvarově neliší odchylky kruhovitosti. Všechny řezy jsou zobrazeny na CD (v příloze 1).

4.2.4 Válcovitost

Jelikož chyby, způsobující odchylky kruhovitosti existovaly v podobné míře ve všech měřených výškách, odpovídají výsledky válcovitosti výsledkům kruhovitosti. [29]

V následujících tabulkách jsou zaznamenány výsledky měření válcovitosti vnitřního (tab. 9) a vnějšího (tab. 10) průměru. [29]

Tab 9) Vyhodnocení válcovitosti vnitřního průměru [29]

CYLt	Vzorek1 [μm]	Vzorek2 [μm]	Vzorek3 [μm]
Vnitřní	8,58	6,00	14,00

Tab 10) Vyhodnocení válcovitosti vnějšího průměru [29]

CYLt	Vzorek1 [μm]	Vzorek2 [μm]	Vzorek3 [μm]
Vnější	12,91	12,35	15,92

4.3 Porovnání výsledků měření kruhovitosti

Ballbar vyhodnocuje stroj ve stavu pouze nezatíženém, a jedním z cílů diplomové práce je zjišťovat vlastnosti stroje ze vzorku – tzn. ve stavu zatíženém. V této kapitole je porovnána kruhovitosť měřená Ballbarem a pomocí kruhoměru.

Jelikož data z kruhoměru a z Ballbaru byly měřeny s počátkem ve stejném bodě, tj. na ose X v maximu, na ose Y na nule a byly měřeny proti směru hodinových ručiček, tak nebylo třeba posouvat počátky, aby si odpovídaly. Data z kruhoměru ve formátu .pln byly převedeny pomocí softwaru PLN2CVS File convertor do formátu .cvs a následně zpracovány v Excelu. Data z kruhoměru jsou zaznamenávány jako body se souřadnicemi X a Y. Z nich byl dopočítán poloměr a pro každý bod vzdálenost od kružnice nejmenších čtverců.

Převedení dat ze souřadnic na velikost odchylky bylo provedeno za účelem sjednocení porovnávaných hodnot. Data z Ballbaru jsou totiž ve zdrojovém kódu zapsány právě ve formátu odchylek.

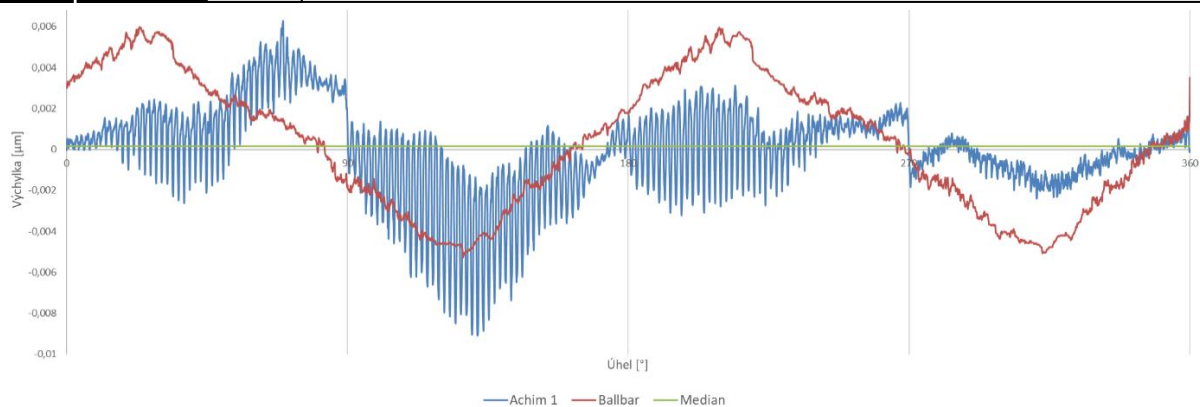
Hodnoty odchylek byly poté vyneseny do grafů, pro každý vzorek jak pro vnitřní, tak vnější průměr. Hodnoty z měření Ballbaru jsou v každém grafu stejné. Počet bodů se odlišuje z důvodu jiných počtů měřených hodnot. Měření kruhovitosti poskytuje 18 tisíc bodů na 360°, kdežto měření kruhové interpolace 2811 bodů na 360°. V grafech jsou vyznačeny svislé průsečíky na hodnotách 90°, 180° a 270°

Maximální a minimální hodnoty kruhovitosti, včetně mediánů jsou pro vnější průměr uvedeny v následující tabulce (č. 11).

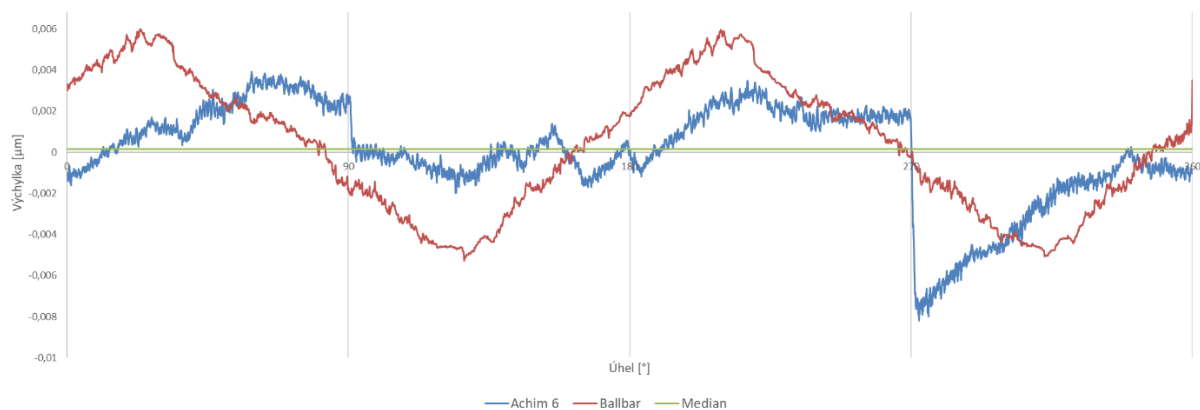
Tab 11) Parametry odchylek od kružnice nejmenších čtverců

	Vnější průměr [mm]		
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Max	0,00628	0,003918	0,004303
Min	-0,009089	-0,008195	-0,006847
Median	0,000152	0,000083	0,000365

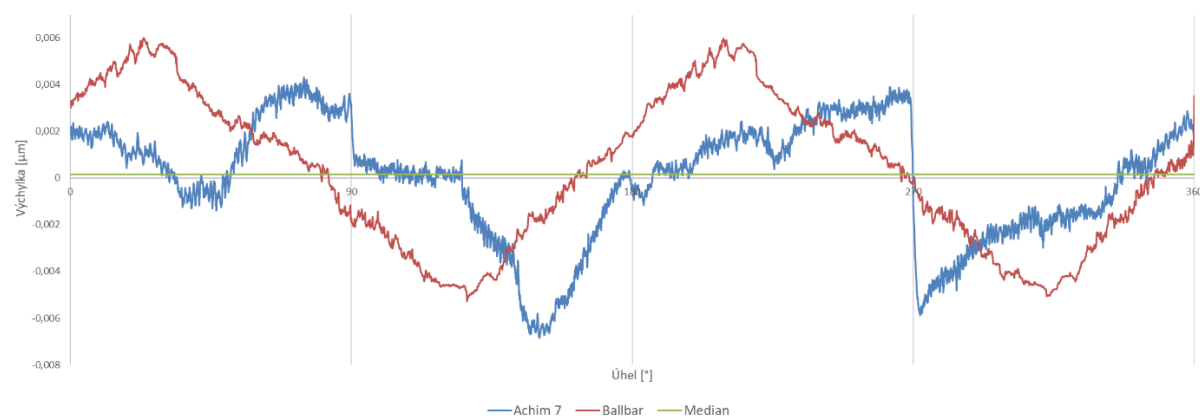
Následující tři grafy vyobrazují porovnání vnější kruhovitosti v zatíženém a nezatíženém stavu vzorků 1 (obr. 34), 2 (obr. 35) a 3 (obr. 36) s hodnotami naměřenými systémem Ballbar (ve směru proti směru hodinových ručiček).



Obr. 34) Porovnání dat vnější kruhovitosti vzorku 1 a Ballbaru v chodu proti směru hodinových ručiček



Obr. 35) Porovnání dat vnější kruhovitosti vzorku 2 a Ballbaru v chodu proti směru hodinových ručiček



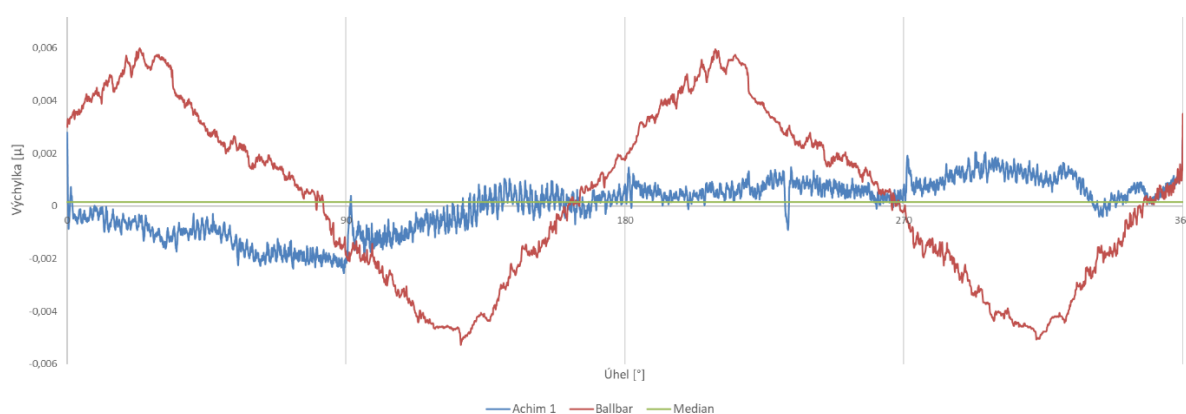
Obr. 36) Porovnání dat vnější kruhovitosti vzorku 3 a Ballbaru v chodu proti směru hodinových ručiček

V grafech lze vidět, že odchylka hodnot v zatíženém a nezatíženém stavu sleduje podobný trend u všech vzorků. Když klesá/stoupá odchylka v nezatíženém stavu, v menší míře klesá/stoupá i odchylka v zatíženém stavu. Stejně tak lze vidět, že velmi často nabývají

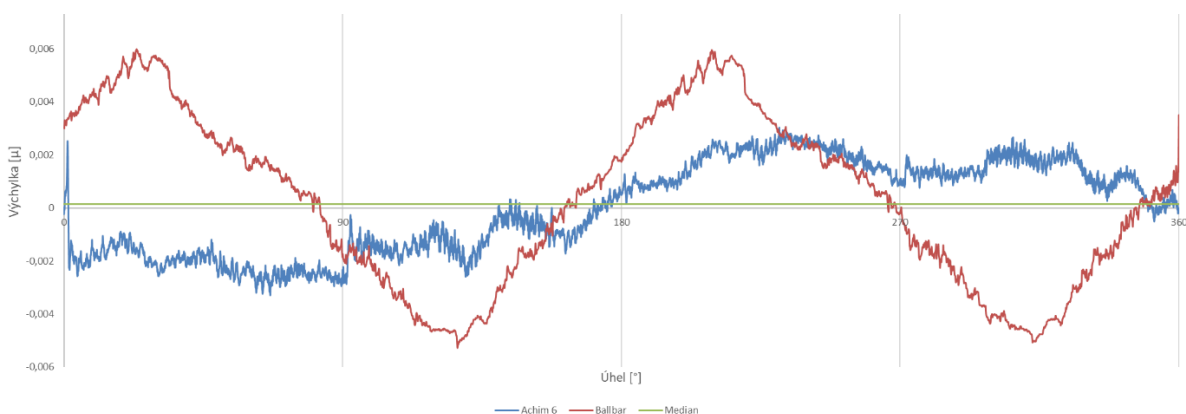
stejných znamének v daných úsecích (např. hodnoty v druhém kvadrantu vzorku 1 jsou u obou typů měření záporné apod.).

Důvodem rozdílu zatíženého a nezatíženého stavu (respektive menší odchylce při obrábění) je existence řezných sil. V nezatíženém stavu závisí pouze na vlastnostech stroje (viz. kapitola měření kruhové interpolace), kdežto odchylky v zatíženém stavu jsou funkcí závislou na řezných silách a vůlích při obrábění. Dochází ke skládání, a tedy ovlivnění výsledných odchylek. [23]

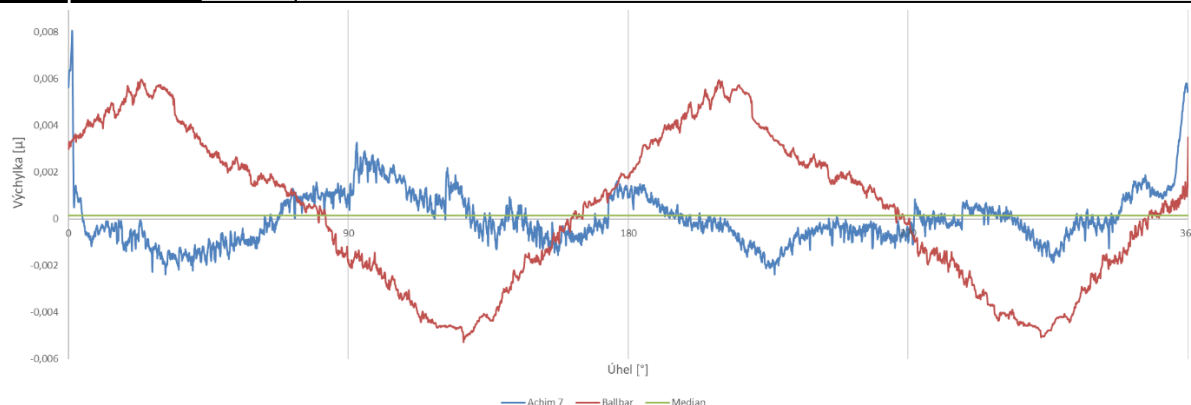
Následující tři grafy (obr. 37, 38 a 39) jsou porovnáním kruhovitostí na vnitřním průměru a odchylek měření Ballbarem.



Obr. 37) Porovnání dat vnitřní kruhovitosti vzorku 1 a Ballbaru v chodu proti směru hodinových ručiček



Obr. 38) Porovnání dat vnitřní kruhovitosti vzorku 2 a Ballbaru v chodu proti směru hodinových ručiček



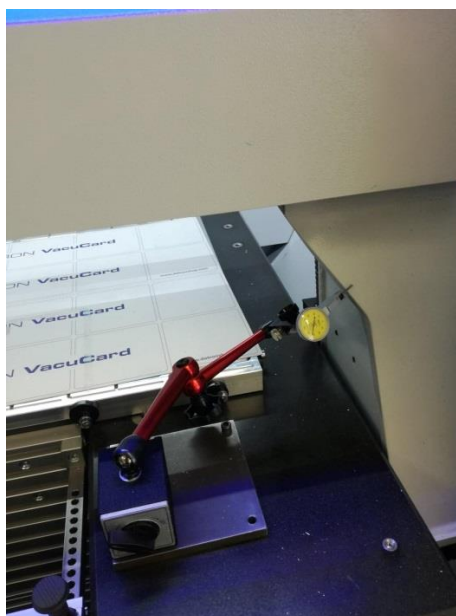
Obr. 39) Porovnání dat vnitřní kruhovitosti vzorku 3 a Ballbaru v chodu proti směru hodinových ručiček

Na předchozích obrázcích lze vidět, že odchylka měření kruhovitostí je daleko menší než z měření Ballbaru. Výjimkou je vzorek 3, který v úhlu 0° má bodový skok skoro 0,01mm. Tento extrém lze pozorovat i volným okem.

4.3.1 Analýza skoku vnějšího průměru

V zatíženém stavu lze u vzorků 2 a 3 pozorovat skokovou změnu v bodě 270° (viz. obr 35 a 36). Velikost této odchylky je v průměru $10\mu\text{m}$. Tento bod se vyskytuje přímo v bodě zvratu osy Y (v nejnižší hodnotě).

Na doporučení Ing., Dipl.-Ing Michala Holuba Ph.D bylo provedeno ověření teorie, že tento skok je projevem vůle v posuvu portálu v ose Y. Způsob ověření spočíval v přichycení úchylkoměru s rozlišením $0,002\text{mm}$ ke stolu a opřením měřicí sondy o portál (viz obr. 40). Na portál se následně ručně zatlačilo, odečetla se odchylka a dopočítala pomocí úhlu jaká je odchylka v ose posuvu.



Obr. 40) Metoda zjištění vůle posuvu

Zjištěná vůle posuvu byla $12\mu\text{m}$, což je možná příčina vznik skoku v bodu reverze.

4.4 Vyhodnocení textury povrchu

Jako jeden z diagnostických signálů ze vzorku bylo zvoleno vyhodnocení textury povrchu. Cílem bylo určit rozhodující parametr textury povrchu, který bylo možné předepsat na výkres zkušebního vzorku. Bylo provedeno měření textury povrchu na všech třech vzorcích se zaměřením na již známé nesrovnalosti. Jako ideální „vzorový“ kus byl vybrán vzorek 3 a jako neshodný byl zvolen 1. Měřená plocha byla vždy vnější obrobený průměr (viz. Výkres součástí v přílohách)

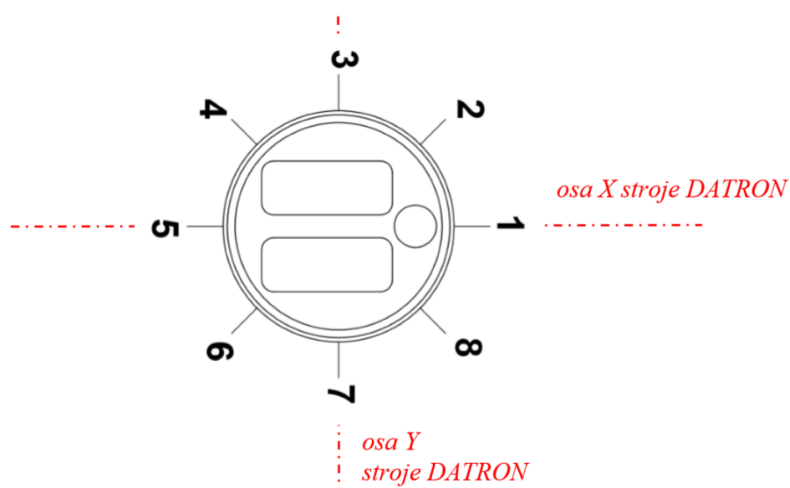
Textura povrchu byla vyhodnocena třemi metodami. První dvě vycházejí z měření na koherenčním rastrovacím interferometru Talysurf CCI Lite (dále jen CCI) tj. bezkontaktní metodou. Zde je provedeno vyhodnocení plošných parametrů textury a profilových. Třetí měření probíhalo za použití kruhoměru se speciálním měřícím ramínkem s diamantovým dotekem jako zařízení na vyhodnocování kruhové drsnosti, tedy se jedná o metodu kontaktní. [31][32]

4.4.1 Terminologická poznámka

Přesnost překladů norem ISO do českého jazyka není optimální. Důsledkem je nejednotnost překladu pojmu „surface texture“, která je překládá buď jako struktura, nebo textura povrchu. Dle doporučení prof. Bohumila Bumbálka bude v textu jednotně použit termín „textura povrchu“, jelikož slovo textura lépe vystihuje geometrický charakter topografie. [33]

4.4.2 Vyhodnocení textury bezkontaktní metodou

Nejprve je třeba všechny vzorky očistit a odmastit. Na každém vzorku bylo vyznačeno osm měřících míst uprostřed vnějšího válce (dále označeny jako body). Každých 45° tak, aby první bod odpovídal počátku užitém pro měření kruhoměrem (viz. obr. 41). V každém bodu byly zaznamenány tři povrchy, které byly následně sešity s překrytím 25%. Vznikla tak sešitá plocha o délce 4,5mm. Všechny vzorky byly měřeny objektivem se zvětšením 10x. [31][34]



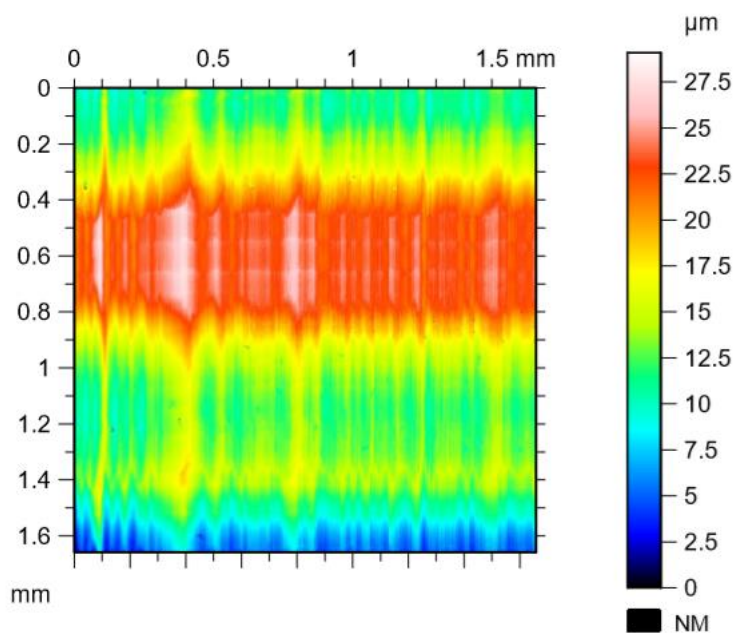
Obr. 41) Měřící body na vzorcích

Tímto způsobem měření bylo tedy vytvořeno osm ploch pro každý vzorek, které byly následně mezi sebou porovnány. Problémem této metody avšak je však vytvoření nepřesností při automatickém dopočítávání při sešívání ploch. Další nepřesnosti byly vneseny v bodech 1,3,5,7. Toto jsou body, které odpovídají bodům reverze posuvů obrábění, a tedy

pro co nejvyšší objektivnost bylo rozhodnuto, že vyhodnocování bude využívat bodů 2, 4, 6 a 8.

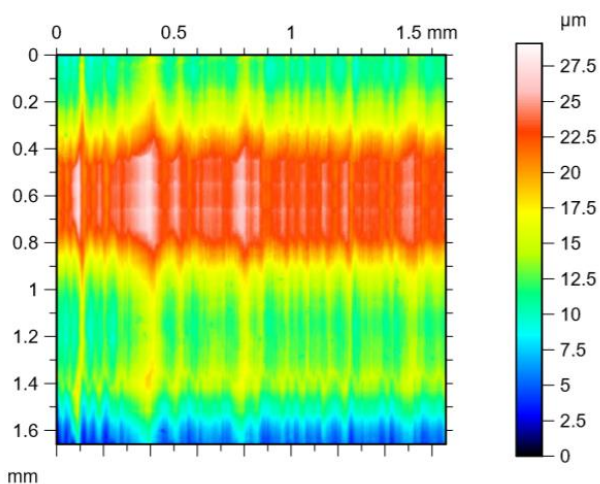
Vyhodnocení je provedeno na vzorcích 1 a 3, jelikož 3 je brán jako vzorový a 1 jako neshodný. Z jejich vzájemného porovnání byl vyvozen závěr k předpisu na výkres.

Následující plochy jsou všechny z bodu 4 na vzorku 1, jelikož toto je oblast, ve které je přítomná i okem viditelná vada (zvlnění povrchu). Jako první je třeba vytvořit neupravenou naměřenou plochu (viz. obr. 42).



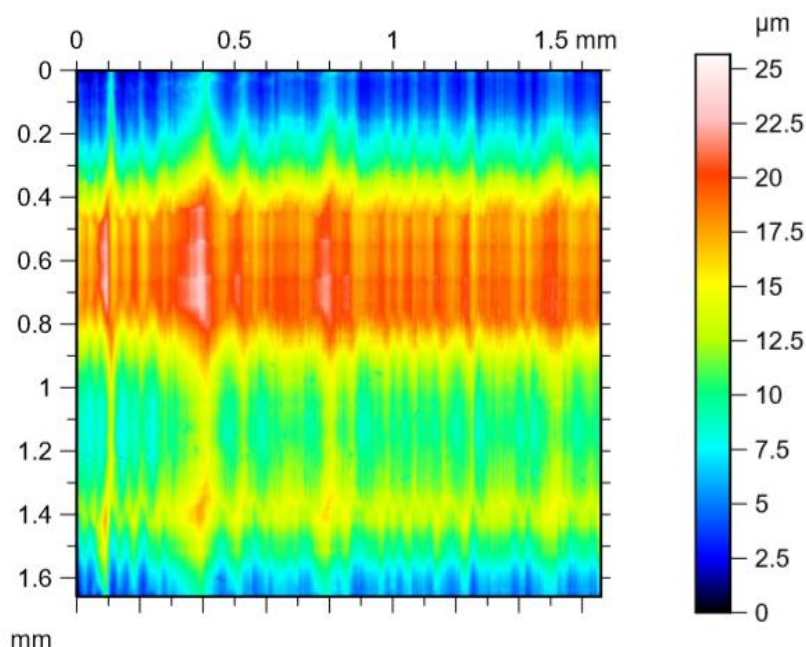
Obr. 42) Naměřená plocha vzorku 1, Bod 4

Následně bylo třeba dopočítat chybějící body, které interferometr nebyl schopen změřit. Výstupem byla plocha se všemi dopočítanými body (viz obr. 43). [35]



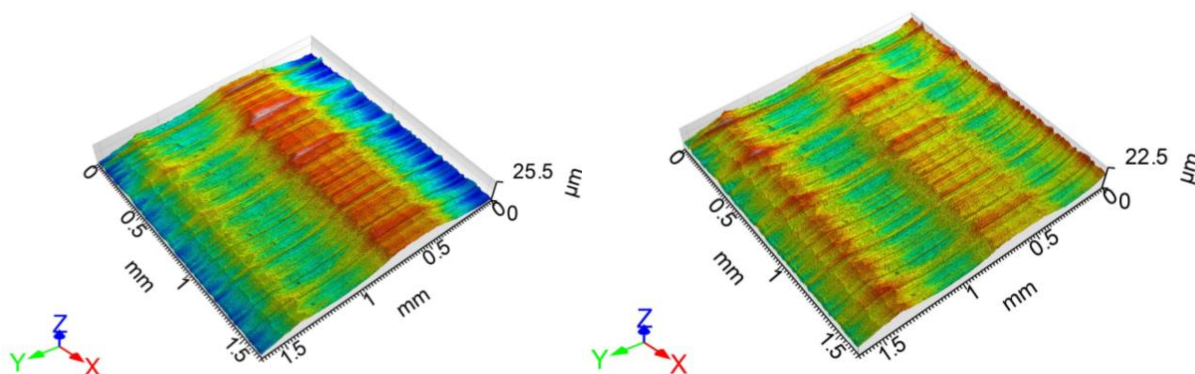
Obr. 43) Plocha s dopočítanými chybějícími body vzorku 1, Bod 4

Dále byl odstraněn tvar (měřená plocha je částí vnějšího průměru). Software byl schopen rozeznat, že se jedná o tvar válce, a byl tedy využit tento filtr. Pokud by software nebyl schopen rozeznat tvar válce, lze využít odstranění polynomem stupně dle tvaru plochy. Z této plochy (viz. obr. 44) je možné získat profily pro vyhodnocení profilových parametrů plochy a také na této ploše bylo provedeno vyhodnocení parametrů plošných. [35]



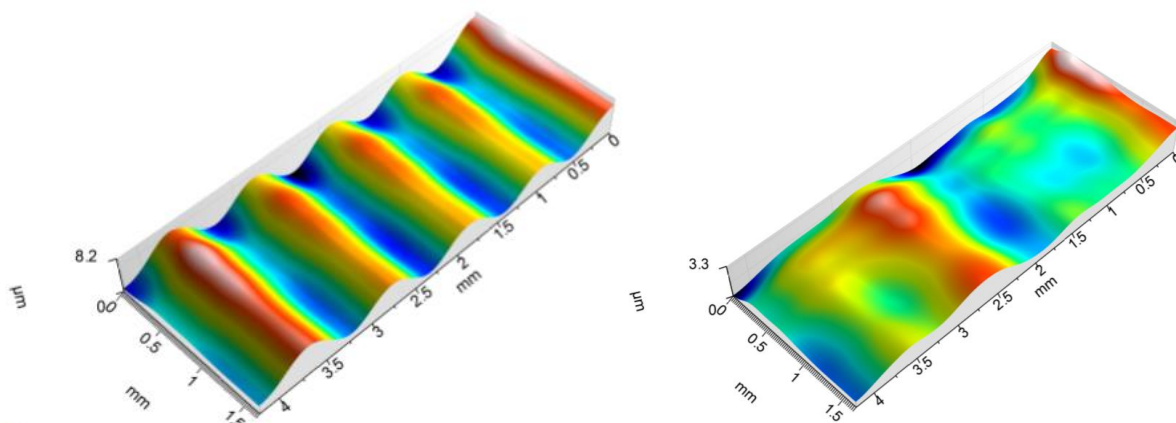
Obr. 44) Plocha s odstraněným tvarem (Leveled Surface) vzorku 1, Bod 4

Tyto plochy jsou názorněji vyobrazeny na následujících obrázcích, kde jsou převedeny do prostoru. Opět jsou zde vyobrazeny plochy bez odstraněného a s odstraněným tvarem (viz. obr. 45).



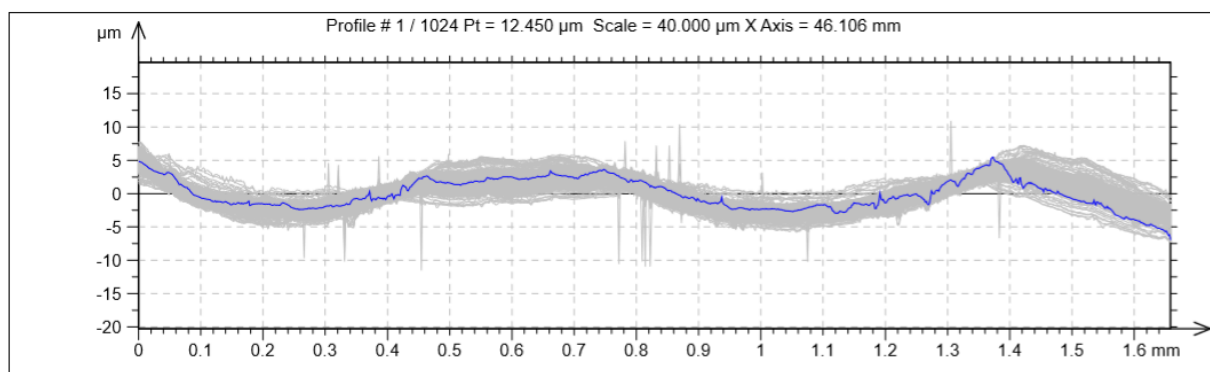
Obr. 45) Porovnání ploch bez odfiltrovaného tvaru (vlevo) a s odfiltrovaným tvarem (vpravo) vzorku 1, Bod 4

Již zde lze vidět na ploše vzorku 1 s odfiltrovaným tvarem, že vykazuje periodicky se opakující výchylku. Tato hypotéza je potvrzena vyfiltrováním vlnitosti (Gaussův filtr, 0,8mm) na následujícím obrázku (viz. obr. 46). Zde je také porovnán s plochou odpovídajícího bodu na vzorku vzorku 3. Pro názornost jsou využity sešité plochy. [31][31]



Obr. 46) Znáznornění zvlnění sešitých ploch vzorku 1-bod4 (vlevo) a vzorku 3-bod4 (vpravo)

Jak bylo psáno výše, z povrchů S-F byly vyhodnoceny parametry plošné textury pro všech osm bodů na každém ze zkušebních vzorků. Následně z povrchů S-F byly vytvořeny profily (1024 profilů pro každou měřenou plochu). Jako příklad je zde vyobrazen výstup programu TalyMap - plocha 4 ze vzorku 1 (viz. obr. 47). [35]

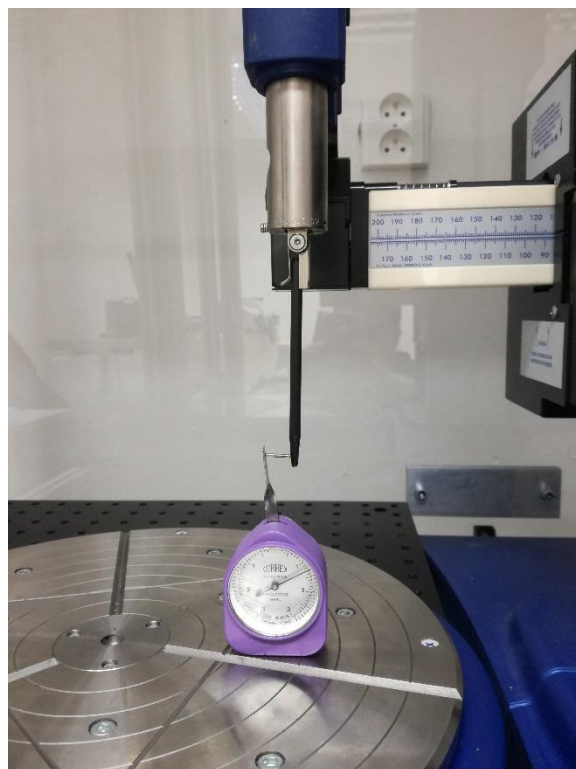


Obr. 47) Profily z bodu č.4 vzorku 1

4.4.3 Vyhodnocení textury pomocí kruhoměru

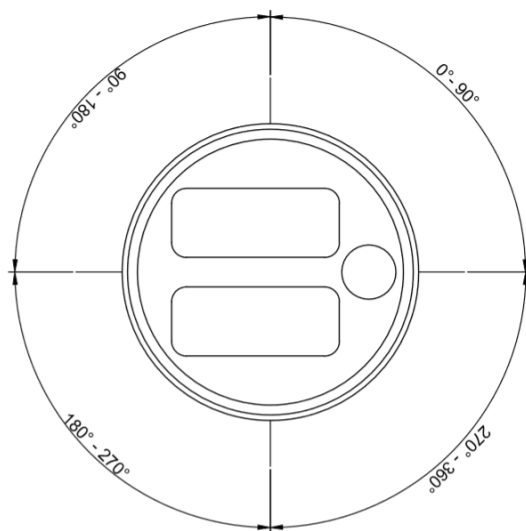
Jelikož se jedná o vyhodnocení textury povrchu na kruhové součásti, využití konvenčního kontaktního profilometru nemá smysl. Byl využit kruhoměr Talyrond TR595S (stejný kruhoměr jako byl využit pro měření kruhovitosti) poskytnutý ČMI. Rozdílem je, že pro měření kruhovitosti byl využit hrot s rubínovou kuličkou o průměru 2 mm, která odfiltrovala část textury povrchu a zachovala pouze tvarovou odchylku. Pro vyhodnocení kruhové drsnosti byl využit hrot o poloměru zaoblení špičky 2 μm. S tímto hrotem lze vyhodnocovat plochy s parametrem drsnosti R_a menším než 0,5 μm. [28]

Dále pak bylo potřeba snížit přitlačnou sílu měřicího doteku na hodnotu 0,0034-0,0044 N. (viz. obr. 48) [28]



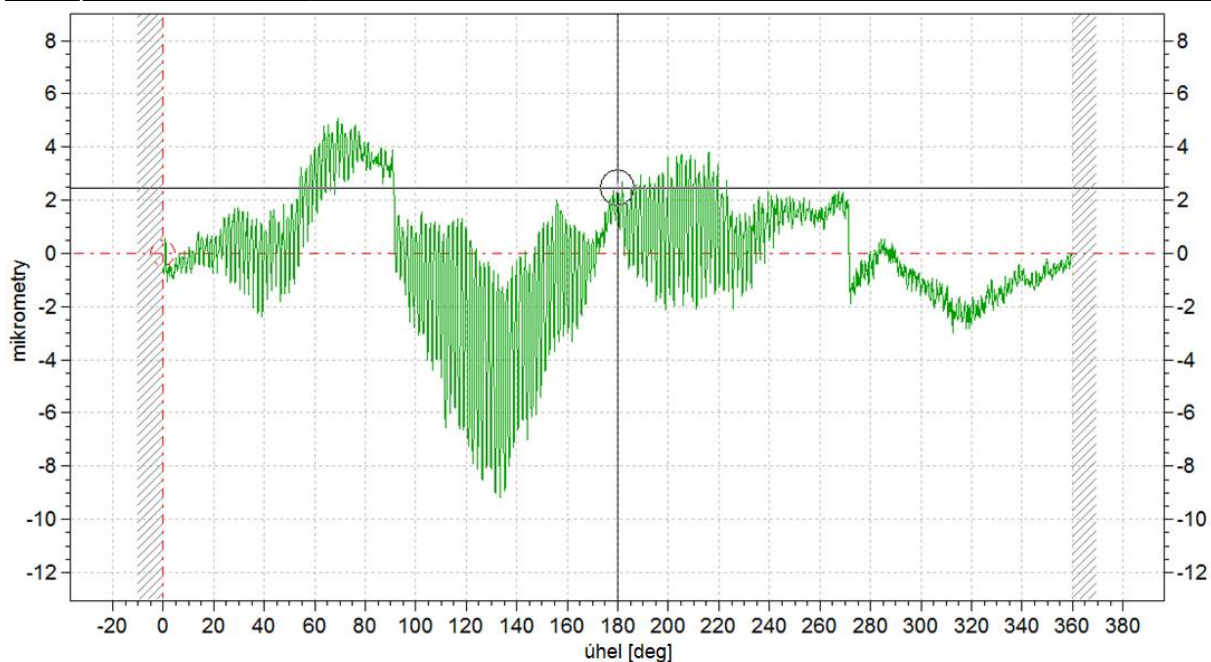
Obr. 48) Nastavení přitlačné síly

Každý vzorek byl naměřen z 360° ve třech výškách a převeden z polárního grafu do profilu. Získali jsme tak pro každý vzorek tři profily. Z předchozích měření je zřejmé, že po celém obvodu není textura homogenní, a proto se pro zjednodušení a možnost porovnání rozdělil profil do čtyř částí. Každá z částí odpovídá 90° (tedy i bodu reverze posuvů) dle obr. 49, níže.

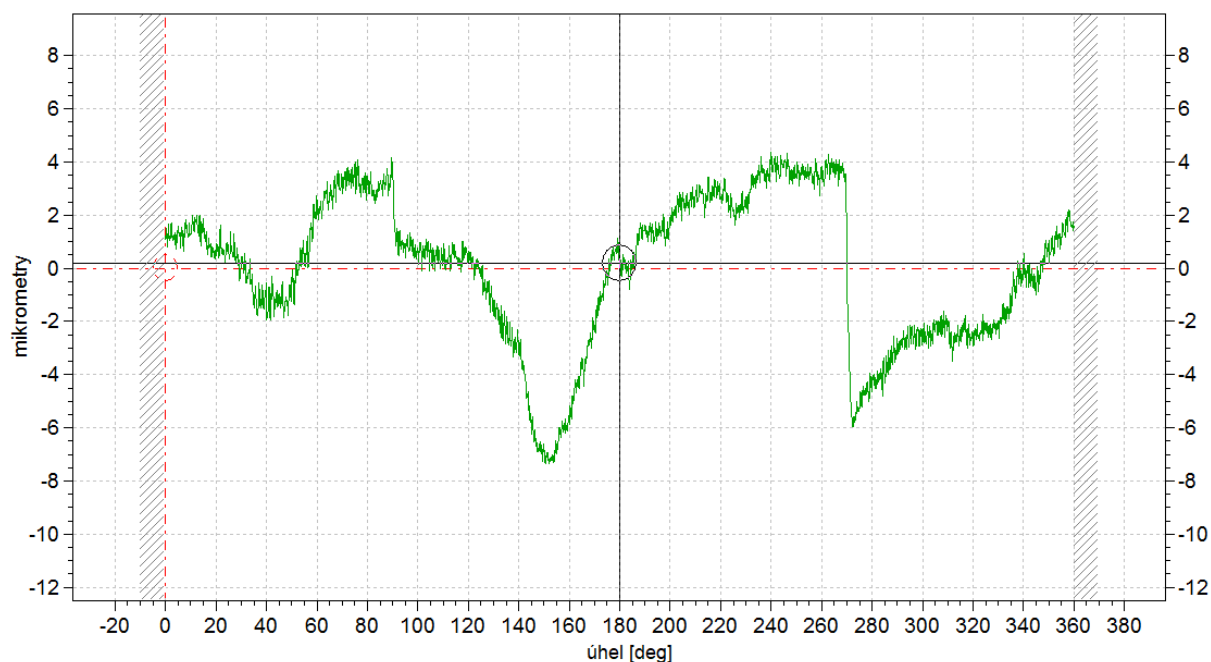


Obr. 49) Zóny pro extrakci vyhodnocovacích délek

Počátek, tj. 0° , je jako u předchozích měření (měření na kruhoměru, měření na CCI) totožný pro možnost porovnání.



Obr. 50) Celkový profil obvodu vzorku 1



Obr. 51) Celkový profil obvodu vzorku 3

Na předchozích dvou obrázcích (obr. 50 a 51) jsou vyobrazeny celkové naměřené profily vzorků 1 a 3. Jako u předchozích částí i zde se za dobrý vzorek považuje 3 a za neshodný 1. Na obou dvou lze vidět pro potvrzení předchozích měření opakující se chyby – „zvlnění“ povrchu vzorku 1, znatelné odlišení každého kvadrantu včetně skoků v bodech reverze 90° a 270° .

Z těchto částí profilů byl vytvořen základní profil, profil vlnitosti a drsnosti a k nim vypočteny odpovídající parametry. [28][32]

4.4.4 Výběr nejvhodnějších parametrů textury pro předepsání na výkres zkušebního vzorku

Nejprve bylo vyhodnoceno měření pomocí CCI a následně pro potvrzení a doplnění bylo provedeno pro měření kruhových profilů.

Vyhodnocení na CCI bylo provedeno následovně. Byly zvoleny výškové parametry profilů drsnosti, vlnitosti, základního profilu a plošné textury. Hodnoty těchto parametrů byly mezi sebou porovnány pomocí odpovídajících si bodů na vzorcích 1 a 3. Percentuální změna je tedy vypočtena pro každý bod samostatně a následně byla zjištěna nejvyšší hodnota změny a bod, na kterém se tato hodnota vyskytovala.

Vyhodnocované parametry byly zvoleny po dohodě s vedoucím práce.

Parametry jsou popsány obecně, vzorce jsou následně pro každý typ profilu/povrchu. Tyto vzorce jsou podobné ale týkají se různých profilů (drsnost, vlnitost, základní profil) nebo povrchu. Jak v popisu, tak ve vyhodnocení jsou parametry uspořádány do skupin podle smyslu parametru – vždy jsou seskupeny ekvivalentní parametry pro různé typy profilů a jejich analogie pro plošnou texturu. K parametrům jsou názorně přiložena schémata, která jsou vždy popsána pro parametry drsnosti, avšak pro ostatní profilové parametry jsou na stejném principu. [31]

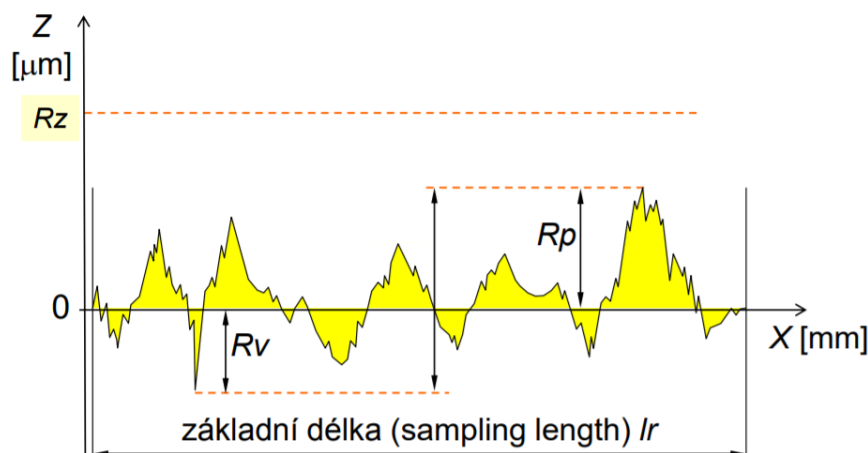
První skupinou parametrů jsou parametry nejvyšší výšky profilu/maximální výšky posuzované povrchu (maximum height of profile/ maximum height of the scale limited surface). Jedná se o absolutní vertikální rozdíl mezi maximálním výstupkem profilu a maximální prohlubní. Parametry nejvyšší výšky profilu jsou tedy sumou parametrů nejvyšší výšky výstupku profilu/ maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu (maximum profile peak height/maximum peak height of the scale limited surface) a největší hloubky prohlubně profilu/maximální hloubky dna posuzovaného povrchu (maximum profile valley depth/maximum pit height of the scale limited surface). Tyto parametry jsou znázorněny na obr. 52. [31] [36]

$$Pz = Pp + Pv [\mu m] \quad (1)$$

$$Wz = Wp + Wv [\mu m] \quad (2)$$

$$Rz = Rp + Rv [\mu m] \quad (3)$$

$$Sz = Sp + Sv [\mu m] \quad (4)$$



Obr. 52) Znázornění parametru nejvyšší výšky profilu drsnosti [37]

Parametry nejvyšší výšky profilu/maximální výšky vrcholu posuzovaného povrchu se tedy skládají ze dvou parametrů. První je nejvyšší výška výstupku profilu (maximum profile peak height). Pro povrch se jedná o maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu (maximum peak height of the scale limited surface). Tyto parametry se vypočítají následovně: [31] [36]

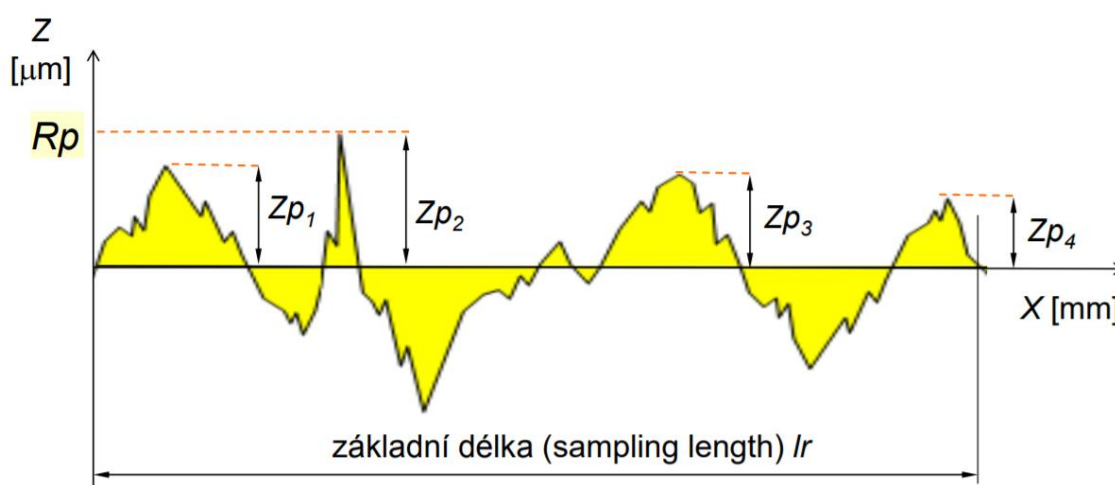
$$Pp = \max (Zp_i) [\mu m] \quad (5)$$

$$Wp = \max (Zp_i) [\mu m] \quad (6)$$

$$Rp = \max (Zp_i) [\mu m] \quad (7)$$

$$Sp = \max \{z_p(x, y)\} [\mu m] \quad (8)$$

, kde výška Zp_i je výška nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky (viz. obr. 53). [31]



Obr. 53) Znázornění parametru nejvyšší výšky výstupku profilu drsnosti [37]

Druhým příspěvkem k nejvyšší výšce profilu je největší hloubka prohlubně profilu (maximum profile valley depth), respektive maximální hloubka dna posuzovaného povrchu (maximum pit height of the scale limited surface). [31] [36]

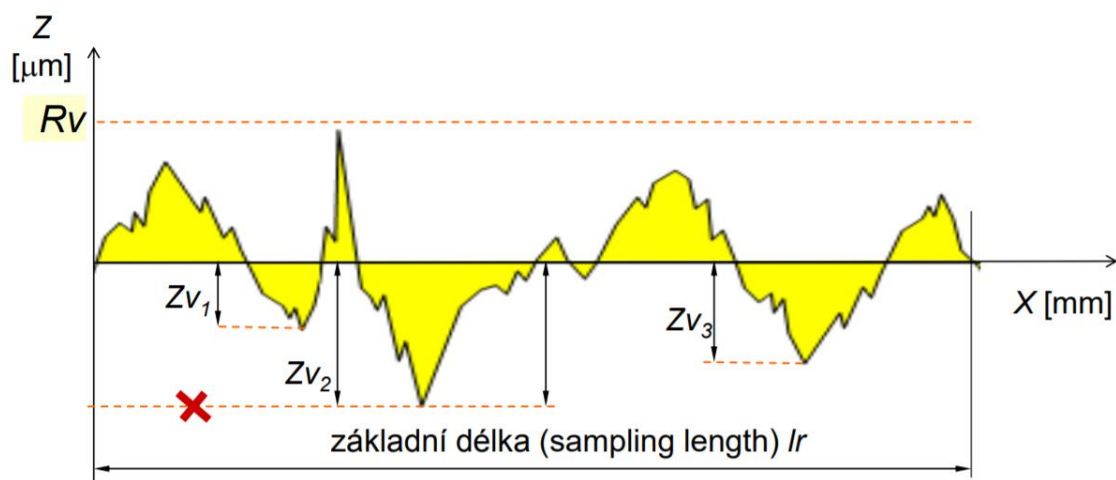
$$Pv = \max (|Zv_i|) [\mu m] \quad (9)$$

$$Wv = \max (|Zv_i|) [\mu m] \quad (10)$$

$$Rv = \max (|Zv_i|) [\mu m] \quad (11)$$

$$Sv = \max \{|z_v(x, y)|\} [\mu m] \quad (12)$$

, kde hodnota Zv je hloubka maximální (nejnižší) prohlubně profilu v rozsahu základní délky. Jak je vidět na schématu (viz. obr. 54), hodnota největší hloubky prohlubně je vždy kladná. [31]



Obr. 54) Znázornění parametru největší hloubky prohlubně profilu drsnosti [37]

Další skupinou jsou parametry aritmetické úchylky. Pro profilovou metodu (viz. obr. 55) se parametr nazývá průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu (arithmetical mean deviation of the assessed profile) a jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Pro povrch se nazývá průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu (arithmetical mean height of the scale limited surface) a jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot koordinací uvnitř určeného povrchu. [31] [36]

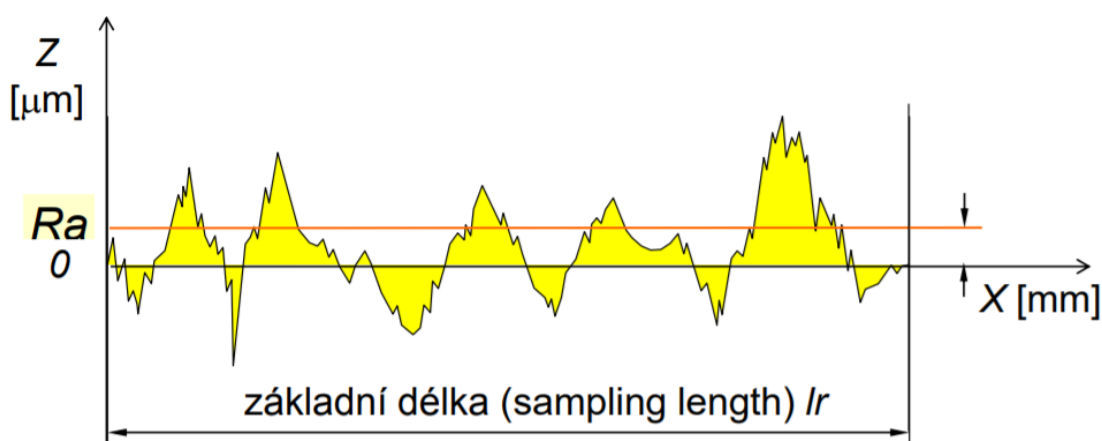
$$Pa = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (13)$$

$$Wa = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (14)$$

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx [\mu m] \quad (15)$$

$$Sa = \frac{1}{|A|} \iint_A |z(x,y)| dx dy [\mu m] \quad (16)$$

,kde lr je základní délka, $Z(x)$ je hodnota pořadnice a A je určená plocha.



Obr. 55) Znáznornění parametru průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu drsnosti [37]

Další vyhodnocovanou skupinou parametrů jsou parametry průměrné kvadratické úchylky. Pro profilové parametry (viz. obr. 56) se hovoří o průměrné kvadratické úchylce posuzovaného profilu (root mean square deviation of the assessed profile) a tím je rozuměná směrodatná odchylka (kvadratický průměr) souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Analogií pro plošnou texturu vyjadřuje parametr průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu (root mean square height of the scale limited surface). [31] [36]

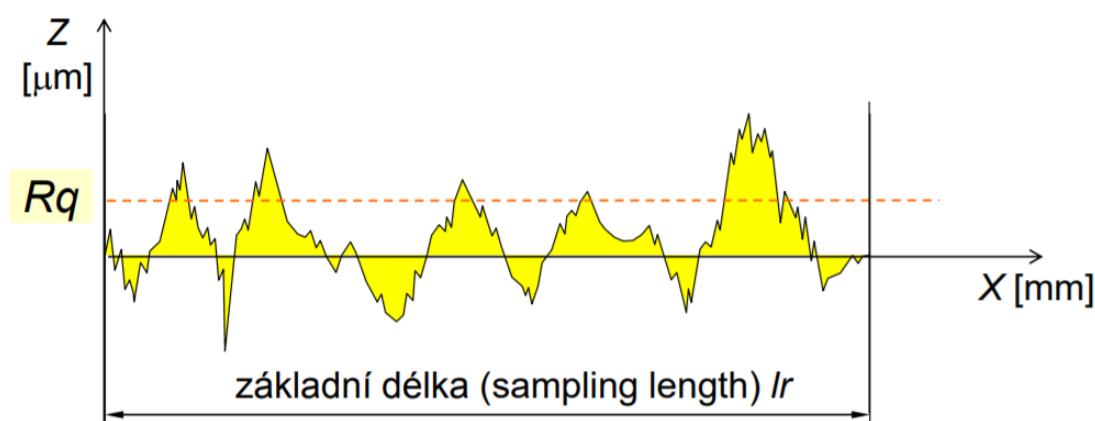
$$Pq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2 dx} [\mu m] \quad (17)$$

$$Wq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2 dx} [\mu m] \quad (18)$$

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2 dx} [\mu m] \quad (19)$$

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{|A|} \iint_A z^2(x, y) dx dy} [\mu m] \quad (20)$$

,kde lr je základní délka, $Z(x)$ je hodnota pořadnice a A je určená plocha.



Obr. 56) Znázornění parametru průměrné kvadratické úchylky posuzovaného profilu drsnosti [37]

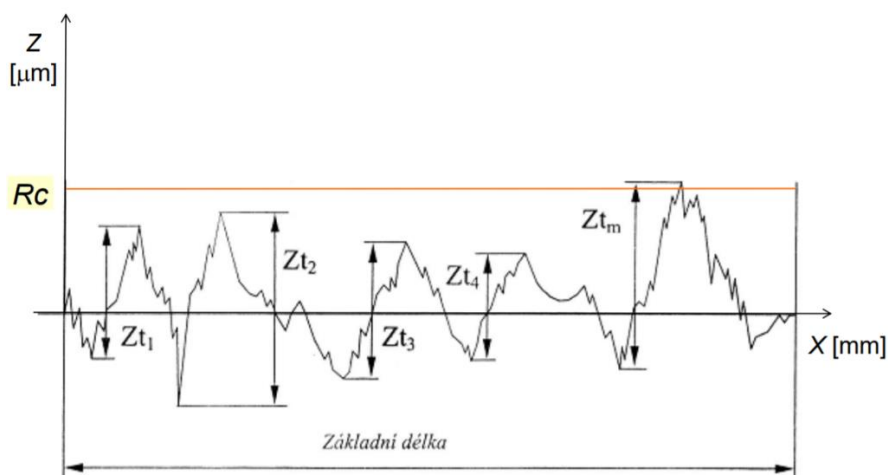
Další trojicí parametrů jsou parametry průměrné výšky prvků profilu (mean height of profile elements). Jedná se o průměrnou hodnotu výšek prvků profilů (Z_t) v rozsahu základní délky (viz. obr. 57). [37]

$$Pc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (21)$$

$$Wc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (22)$$

$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad (23)$$

,kde Zt je výška prvku profilu.



Obr. 57) Znázornění průměrné výšky prvků profilu drsnosti Rc [37]

Další skupinou jsou parametry celkové výšky profilu (total height of profile) a to o parametry Pt , Wt a Rt . Jedná se o součet výšky Zp nejvyššího výstupku daného profilu a hloubky Zv nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky. [37]

Předposlední skupinou jsou parametry špičatosti (kurtosis) posuzovaného profilu. Špičatost je podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky. Vzorce pro výpočet špičatostí jsou následující. [37]

$$Pku = \frac{1}{Pq^4} * \left[\frac{1}{lr} * \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right] \quad (24)$$

$$Wku = \frac{1}{Wq^4} * \left[\frac{1}{lr} * \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right] \quad (25)$$

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} * \left[\frac{1}{lr} * \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right] \quad (26)$$

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} * \left[\frac{1}{|A|} * \iint_A z^4(x,y) dx dy \right] \quad (27)$$

,kde lr je základní délka, $Z(x)$ je hodnota pořadnice a A je určená plocha.

Poslední skupinou parametrů jsou parametry šikmosti (skewness) posuzovaného profilu. Šikmost je je podíl průměrné hodnoty třetích mocnin souřadnic (pořadnic) $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty Rq v rozsahu základní délky. Šikmost u hodnocení povrchu je kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot krychle Sq uvnitř určené plochy (A). Vzorci pro výpočet jsou následující.[37]

$$Psk = \frac{1}{Pq^3} * \left[\frac{1}{lr} * \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (28)$$

$$Wsk = \frac{1}{Wq^3} * \left[\frac{1}{lr} * \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (29)$$

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} * \left[\frac{1}{lr} * \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad (30)$$

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} * \left[\frac{1}{|A|} * \iint_A z^3(x,y) dx dy \right] \quad (31)$$

,kde lr je základní délka, $Z(x)$ je hodnota pořadnice a A je určená plocha.

V následující tabulce (tab. 12) jsou vypsány vybrané výškové parametry, a jejich vyhodnocení. Parametry jsou vždy rozděleny do skupin podle smyslu parametru. Profily vlnitosti a drsnost byly vyfiltrovány pomocí Gaussova filtru 0,8 mm. Výsledky všech měření jsou v příloze. [31]

Tab 12) Porovnání výškových parametrů z TalysurfCCI

	Vzorek1-bod4	Vzorek 3-bod4	Nejvyšší zlepšení
Pz [μm]	9,030	3,071	-66%
Wz [μm]	2,997	0,627	-79%
Rz [μm]	4,400	1,651	-62%
Pv [μm]	3,977	1,354	-66%
Wv [μm]	1,562	0,231	-85%
Rv [μm]	1,997	0,830	-58%
Pp [μm]	5,052	1,717	-66%
Wp [μm]	1,435	0,397	-72%
Rp [μm]	2,402	0,821	-66%
Pa [μm]	1,889	0,432	-77%
Wa [μm]	0,989	0,161	-84%
Ra [μm]	0,992	0,194	-80%
Pq [μm]	2,145	0,528	-75%
Wq [μm]	1,086	0,184	-83%
Rq [μm]	1,117	0,248	-78%
Pc [μm]	6,499	0,616	-91%
Wc [μm]	2,165	0,312	-86%
Rc [μm]	2,447	1,042	-57%
Pt [μm]	17,193	14,667	-15%
Wt [μm]	4,282	2,482	-42%
Rt [μm]	12,407	11,077	-11%
Pku [μm]	20,565	67,576	229%
Wku [μm]	1,819	1,782	-2%
Rku [μm]	15,684	20,322	30%
Psk [μm]	0,513	0,951	85%
Wsk [μm]	0,064	0,066	1%
Rsk [μm]	0,229	0,307	34%

Zvýrazněn je tedy parametr, který bude využit jako předpis tolerance na výkrese. Parametr Pc byl zvolen kvůli tomu, že jeho hodnoty byly nejcitlivější. Také je to parametr vyhodnocený bez nutné filtrace (tedy umělé „úpravy“) povrchu. Dále je zvýrazněn parametr Ra, který také vykazoval vysokou citlivost. I přes vysokou citlivost parametru Pku, po dohodě s vedením firmy a vedoucím byly zvoleny předchozí dva parametry. [31]

V následující tabulce (tab. 13) jsou porovnány plošné parametry textury povrchu. Tyto parametry byly vyhodnoceny z povrchu S-F.

Tab 13) Porovnání plošných parametrů textury

Parametr	Vzorek 1-Bod4	Vzorek 3-Bod4	Změna
Sz [μm]	22,548	16,259	-28%
Sv [μm]	12,306	5,955	-52%
Sp [μm]	10,242	10,303	1%
Sa [μm]	1,984	0,914	-54%
Sq [μm]	2,346	1,169	-50%
Sku [μm]	2,326	3,635	56%
Ssk [μm]	0,145	0,433	198%

V předchozí tabulce je vidět, že plošné parametry jsou vždy v každé skupině ty, které vykazují nejmenší změnu. Parametr Ssk vykazuje relativně vysokou citlivost, ale po dohodě s vedením a vedoucím nebyl vybrán pro předpis. Nebyly tedy zvoleny pro předepsání.

Dalším z výsledků měření je potvrzení vizuální kontroly před měřením, že měřený bod 4 na prvním vzorku byl z hlediska parametrů nejhorším místem na vzorku 1. Všechny maximální změny parametrů (viz. tabulka 13) jsou z obou vzorků na měřeném bodě 4.

4.4.5 Porovnání všech parametrů

Pro kontrolu byly porovnány všechny parametry v bodech 4 na vzorcích 1 a 3. Byly porovnány parametry dle norem ČSN EN ISO 4287 pro profilové parametry a ČSN EN ISO 25178 pro plošné parametry.

Celkové vyhodnocení je v příloze, a i když jsou některé parametry které vykazují vyšší změnu, jedná se o parametry filtrovaných povrchů. Prvním parametrem základního profilu je právě námi zvolený parametr Pc.

4.4.6 Vyhodnocení profilů z kruhoměru

Následně bylo provedeno porovnání profilových parametrů získaných kruhoměrem. Jelikož se v daných kvadrantech profily nelišily podle výšky, byly parametry každého kvadrantu pro každý vzorek zprůměrovány. Opět byl vybrán kvadrant s nejlepším a nejhorším povrchem z celkového profilu a nezávisle na vyhodnocování parametrů z CCI byly vybrány stejné části vzorků. Jako vzorový povrch byl zvolen povrch kvadrantu 180°-270° vzorku 3 a jako neshodný povrch byl vybrán povrch kvadrantu 90°-180° vzorku 1. Porovnání je provedeno v následující tabulce, parametry jsou seřazeny dle velikosti změny (viz. tab. 14).

Podařilo se vyhodnotit, kvůli programu kruhoměru, pouze následujících sedm parametrů.

Tab 14) Porovnání parametrů z měření profilů na kruhoměru

	Vzorek 1 90°-180° [μm]	Vzorek 3 180°-270° [μm]	Změna
Wv	1,6787	0,1415	-92%
Wz	3,2602	0,2872	-91%
Wp	1,5815	0,1458	-91%
Ra	2,2502	0,4439	-80%
Wa	2,051	0,4169	-80%
Pp	2,242	1,1653	-48%
Pa	0,777	0,4439	-43%

Jak je vidět, největší změna se projevila v parametrech W_v , W_z a W_p . Většina ostatních se vyskytuje jak v profilových parametrech z CCI, tak z kruhoměru a potvrzují tedy navzájem výsledky měření. Avšak program pro vyhodnocení kruhové drsnosti nenabízel dostatečné možnosti srovnatelné s programem TalyMap. [31]

4.4.7 Porovnání všech metod

Z výsledků vyhodnocení textury je pro předepsání na výkres zkušební vzorku vybrán parametr P_c . [31]

Dalším z možných parametrů, případně do kombinace s parametrem P_c , je možné zvolit parametr R_a . [31]

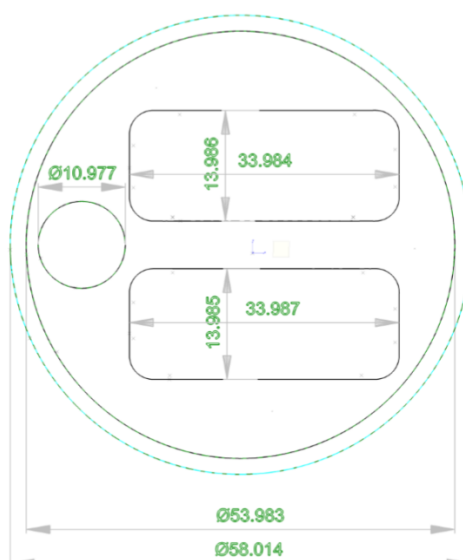
Hodnoty parametrů byly tedy pro výkres kontrolního vzorku stanoveny na P_{cmax} 0,8 a R_{amax} 0,4. Tyto hodnoty byly stanoveny tak, že k hodnotě průměru přičteme trojnásobek směrodatné odchylky a tento výsledek zaokrouhlíme směrem nahoru. Překročení této hodnoty je statisticky málo pravděpodobné. [31]

4.5 Porovnání rozměrů délek a průměrů

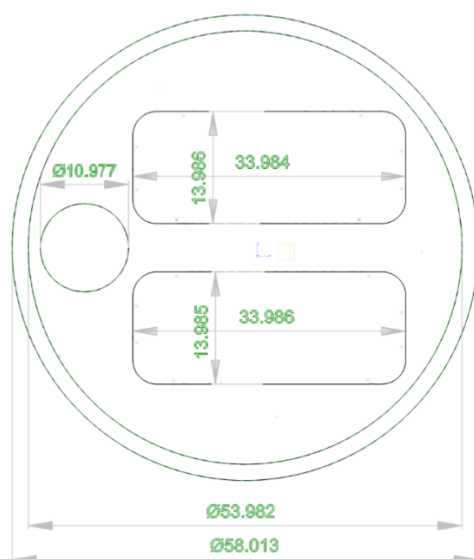
Další možný diagnostický signál je rozdíl délkových rozměrů na zkušebních vzorcích. Tyto rozměry byly změřeny na Univerzitě Obrany na souřadnicovém měřicím stroji výrobci Werth (model Scope-Check) pod vedením kpt. Ing. Davida Dobrockého Ph.D. z katedry strojírenství.

Byly změřeny všechny přesně obrobené rozměry, tzn. vnitřní a vnější průměr, průměr kruhové kapsy a délka (l) a šířka (d) kapes N (na výkrese horní kapsa) a S (na výkrese dolní kapsa).

Výstupem ze souřadnicového měřicího stroje jsou protokoly s naměřenými hodnotami níže (viz. obr. 58 a 59) pro vzorky VZOREK1 a VZOREK3.



Obr. 58) Výstup z měření rozměrů vzorku 1



Obr. 59) Výstup z měření rozměrů vzorku 3

Hodnoty a jejich rozdíly jsou vyhodnoceny v tabulce č. 15, níže.

Tab 15) Porovnání rozměrů vzorků

Rozměr	Vzorek 1 [mm]	Vzorek 3 [mm]	Rozdíl [mm]
Vnitřní průměr	53,983	53,983	0
Vnější průměr	58,014	58,013	0,001
Průměr kapsy	10,997	10,997	0
Kapsa N (d)	13,986	13,986	0
Kapsa N (l)	33,984	33,984	0
Kapsa S (d)	13,985	13,986	-0,001
Kapsa S (l)	33,987	33,986	0,001

Z vyhodnocení je vidět, že v rámci délkových rozměrů měřených na souřadnicovém měřicím stroji se shodný a neshodný vzorek pravděpodobně neliší. Tento závěr ale neznamená, že pro technickou diagnostiku stroje pomocí zkušebního vzorku nemá měření délkových rozměrů význam, jen nevykazuje pro dané vzorky a stroj změnu.

4.6 Návrhy na další možnosti vyhodnocení

V následující kapitole jsou popsány moderní metody pro optické měření rozměrů, geometrických tolerancí a textury povrchu.

4.6.1 Vyhodnocení optickou bezkontaktní metodou přístrojem firmy Keyence

Z důvodu vysoké pořizovací ceny několika specializovaných měřidel – kruhoměru a souřadnicového měřicího přístroje, byla v diplomové práci jako příklad moderní metody obdobné kontroly využita optická metoda za použití systému vyhodnocování rozměrů obrazu objektu (Image Dimension Measurement System). Využitý přístroj byl poskytnut firmou Keyence, a to model IM7020 (viz. obr. 60). [38]

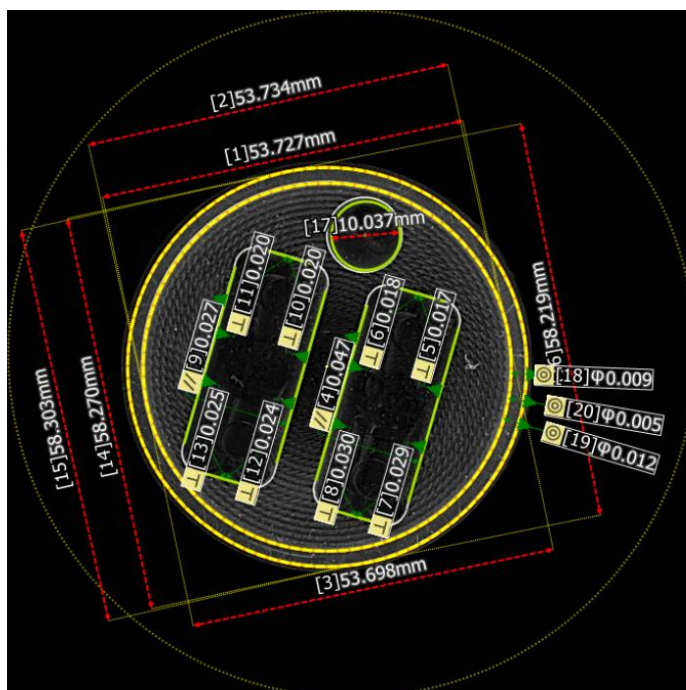


Obr. 60) Přístroj Keyence IM7020 [38]

Tato metoda kombinuje metody souřadnicového měřicího přístroje, měřidel rozměrů a optického komparátoru. Jeho hlavní výhodou je právě jednoduchost ovládání a rychlost měření, která je pro vyhodnocování zkušebního vzorku ideální. Systém automaticky zjistí polohu, orientaci a vzdálenost měřeného objektu, takže na rozdíl od předchozích metod není třeba vytvářet systematiku pro stejné uchycení. Zaostřování a vyhledávání hran je též automatické. [38]

Model IM7020 využívá 6.6 megapixelové kamery pro snímání obrazu. Pro měření obrazu může využít dvě nastavení. Buď s důrazem na velikost měřené plochy nebo s důrazem na vyšší přesnost. Snímaná plocha je tedy čtvercová o straně 200 mm, anebo pro měření s důrazem na přesnost 125mm. Udávaná přesnost je pro využitý způsob měření (měřená plocha 200 mm, bez aretace) $\pm(7+0,02L)$ μm při teplotě $23^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ a hmotnosti vzorku maximálně 2kg. [38]

Pomocí této optické metody jsme byli schopni rychle (v rámci vteřin) změřit délkové rozměry vzorku a geometrické tolerance, což je oproti konvenčním metodám výhoda. Výstupem z měření je schéma měřeného vzorku a protokol z měření, podobné jako ze souřadnicového měřicího stroje. Toto měření bylo provedeno pouze ukázkově firmou Keyence v rámci předváděcí akce na vzorku 2 a 3. Výsledky měření jsou níže (viz. obr. 61). [38]



Obr. 61) Výstup z měření na přístroji Keyence

Jak je na předchozím obrázku vidět, systém vyhodnocuje dle nastavení stejný průměr několikrát v různých bodech. Různé hodnoty stejného průměru jsou důsledkem měření v různých hloubkách. Také metoda naměřila jiné hodnoty než souřadnicový měřicí stroj, ale z časových důvodů se těmto rozdílům nebylo možno blíže věnovat. Zároveň jsou také vyhodnoceny geometrické tolerance dle přednastavených kritérií – rovnoběžnost kapes, kolmosti a souosost a koaxialita. [38]

4.6.2 Využití systému Optosurf

Další z možných moderních metod analýzy je využití systému Optosurf (viz. obr. 62). Ta je bezdotykovou metodou schopná vyhodnotit texturu povrchu pomocí úhlového rozlišování rozptylu světla (Angle-resolved scatter) dle normy VDA 2009:2009. Hodnocení textury vzorku č. 1 pomocí přístroje firmy OptoSurf, GmbH, kterého jádrem je detektor STREULICHTSENSOR OS 500 (viz. obr. 62) bylo provedeno ve spolupráci s firmou Mesing, s.r.o. [39][40]



Obr. 62) Snímací sonda Optosurf [40]

Jedná se o přístroj, který využívá relativně novou metodu analýzy úhlově rozlišeného rozptylu světla (Winkelaufgelöste Streulichtmesstechnik) a která je zatím zpracována pouze

v německé normě VDA 2009:2009. Tato metoda využívá měření úhlů rozprostření odraženého světla pomocí objektivu s vysokou aperturou a pomocí řádkového detektoru s fotodiodami snímá a vyhodnocuje rozložení úhlů rozptýlení v definovaném rozsahu. Toto odražené světlo (potažmo úhly) obsahují veškeré informace o textuře povrchu – o její mikrogeometrii (drsnost) a makrogeometrii (odchylka tvaru). Z tohoto rozložení jsou definovány statistické faktory (např. Aq, Ask, ...). Tyto parametry jsou v dobré korelaci k charakteristikám výrobního procesu (tzn. lze poznat o jakou operaci se jedná). Obecně můžeme uvést, že poloha střední hodnoty rozdělení úhlu rozptylu je funkcí odchylky tvaru a směrodatná odchylka je funkcí drsnosti. [39][40][41]

Z fyzikálních důvodů – nejednoznačnosti při zpětné transformaci, nelze z rozložení úhlů rozptýleného světla dopočítat odpovídající hodnoty parametrů drsnosti. [10]

Metoda je vhodná pro jemně opracované lesklé, nebo zrcadlové povrchy. Je nepoužitelná pro matné, hrubé a silně zakřivené povrchy (válce o malém průměru). [10]

4.6.3 Charakteristické veličiny dle VDA 2009.

Na zkušebním vzorku byly vyhodnoceny tři veličiny – Aqm, Aqs a Aqt. Parametr Aqm je střední hodnota Aq(i) z vícenásobného měření, neboli míra střední hodnoty mikrotextury měřené plochy. Matematicky vyjádřena následovně: [10]

$$Aqm = \frac{\sum_{i=1}^n Aq_i}{n} \quad (32)$$

,kde n je počet měřených hodnot a i je jednotlivá hodnota. [10]

Další veličinou je Aqs, tedy směrodatná odchylka Aq(i) z vícenásobného měření. Interpretovat lze jako míru homogenity mikrotextury měřené plochy. Vyjádření je následovné: [10]

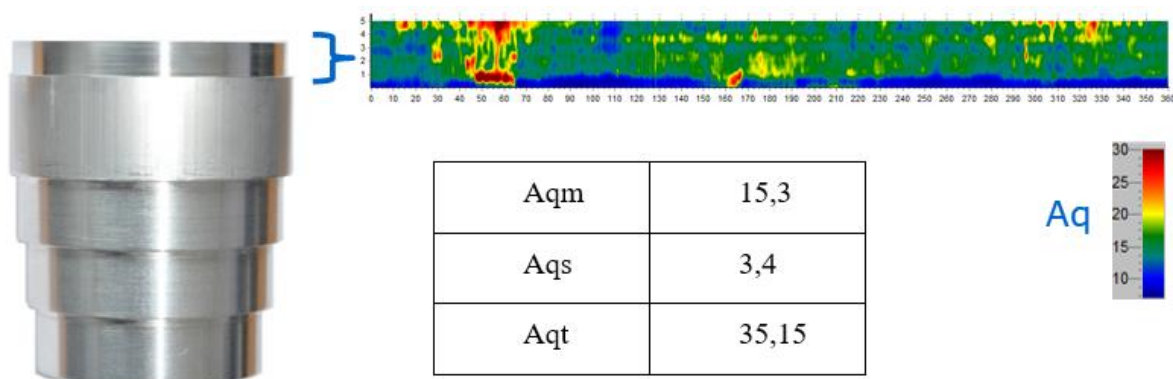
$$Aqs = \frac{\sum_{i=1}^n (Aq_i - Aqm)^2}{n - 1} \quad (33)$$

,kde n je počet měřených hodnot, a i je jednotlivá hodnota. [10]

Poslední veličinou je Aqt, neboli rozpětí hodnot Aq(i) z vícenásobného měření. Touto veličinou je míra pro největší rozdíly textury na měřené ploše. Je výsledkem rozdílu maxima a minima Aq. [10]

$$Aqt = Aq(\max) - Aq(\min) \quad (34)$$

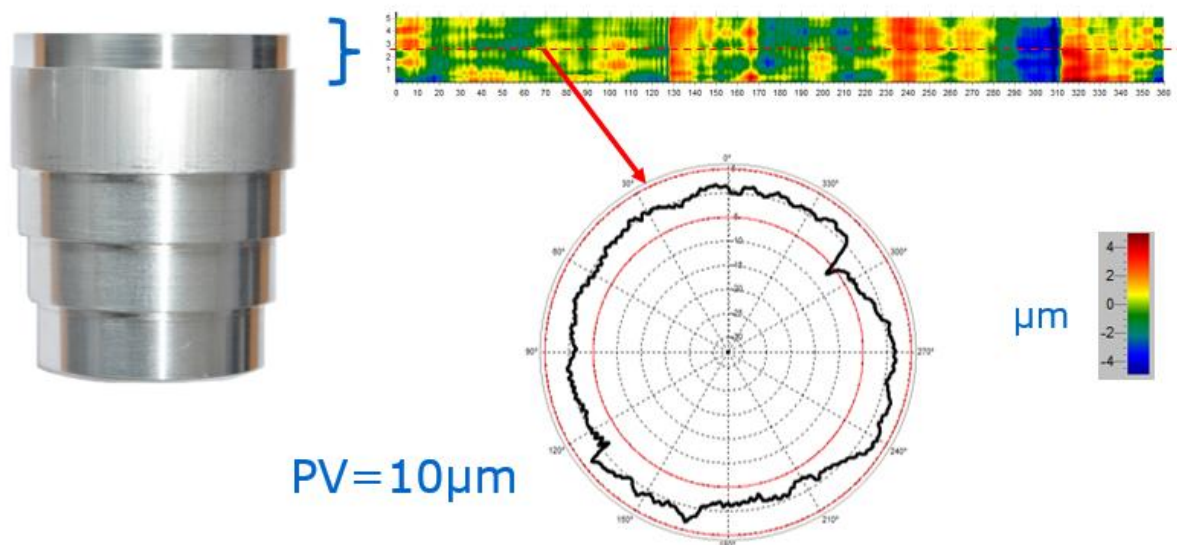
Na následujícím obrázku (viz. obr. 63) je výsledek měření systémem Optosurf na prvním vzorku, včetně parametrů Aqm, Aqs a Aqt. [10]



Obr. 63) Výsledek měření vzorku 1 pomocí Optosurf

Z obrázku je zřejmé, že metoda je aplikovatelná na námi navržený vzorek. Střední hodnota A_{qm} je rovna 15,3, směrodatná odchylka A_{qs} je 3,4 a rozpětí hodnot A_{qt} je 35,15, co potvrzuje značnou nehomogenitu textury vnějšího povrchu. A jak je vidět na obrázku také značí výraznou variabilitu hodnot A_q . [10]

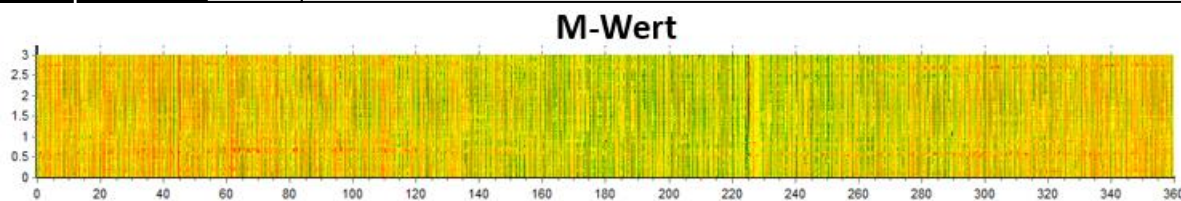
Pomocí této metody byla změřena i odchylka tvaru. Na následujícím měření je vyhodnocena kruhovitost pro vnější válec (viz. obr. 64). [10]



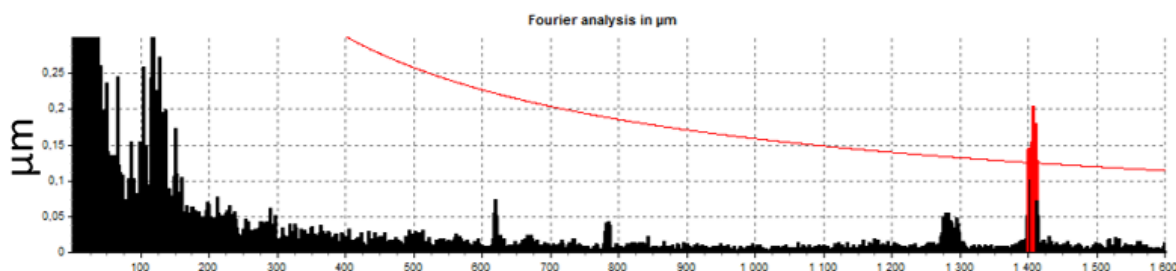
Obr. 64) Vyhodnocení kruhovitosti pomocí přístroje Optosurf[10]

Výsledkem měření je tedy hodnota kruhovitosti $10\mu m$. Lze tedy konstatovat, že tato metoda je velmi dobře srovnatelná s doposud nejpřesnějším hodnocením na kruhoměru Talyrond TR595S, viz kapitola 4.2.2, kde je vypočtena hodnota $RONt$ rovna $9,55\mu m$. [10]

Na následujících dvou obrázcích je vyhodnocení hodnoty M vzorku 1 (viz. obr. 65) a její zpracování pomocí FFT analýzy (viz. obr 66). [10]



Obr. 65) Naměřená data (mapa velikostí odchylek na průměru - 360°)[10]



Obr. 66) Frekvenční spektrum – závislost amplitudy na počtu vln na otáčku[10]

Dle obrázku vidíme, že hlavní přínos by mělo využití FFT analýzy. Červená křivka určuje limitní hodnoty amplitudy v závislosti na počtu vln na otáčku (osa X). FFT analýza je velmi vhodná metoda rychlého provozní hodnocení úchylek tvaru. Červený graf spektra ukazuje zvýšenou četnost odchylek v oblasti 1400 vln na obvod. Tyto vlny detekují nadměrné zvlnění povrchu (chatter marks) na vzorku. [10]

4.7 Porovnání se strojem v provozu

Na závěr diplomové práce, po změření a vytvoření výkresu zkušební vzorku, bylo provedeno ještě jedno měření. Brněnskou firmou EMCO Case a.s., která právě zkoumaný stroj M8 Cube má již přes 800 hodin v provozu, byl pro porovnání obroben další zkušební vzorek (Vzorek 4). Avšak byl využit mírně pozměněný program. V této kapitole je tedy možné vidět vliv obráběcího programu na měřené parametry.

Byl použit rychlejší posuv a například místo obrábění vnějšího průměru po spirále byla zvolena metoda postupného obrábění v krocích. Z tohoto důvodu byl vytvořen se stejným programem vzorek 5 na novém stroji ve firmě DATRON. V následující podkapitole je provedeno porovnání hodnot kruhovitosti, válcovitosti, sousostnosti a textury povrchu podle stejné metodiky jako pro vzorky 1-3.

4.7.1 Vyhodnocení kruhovitosti

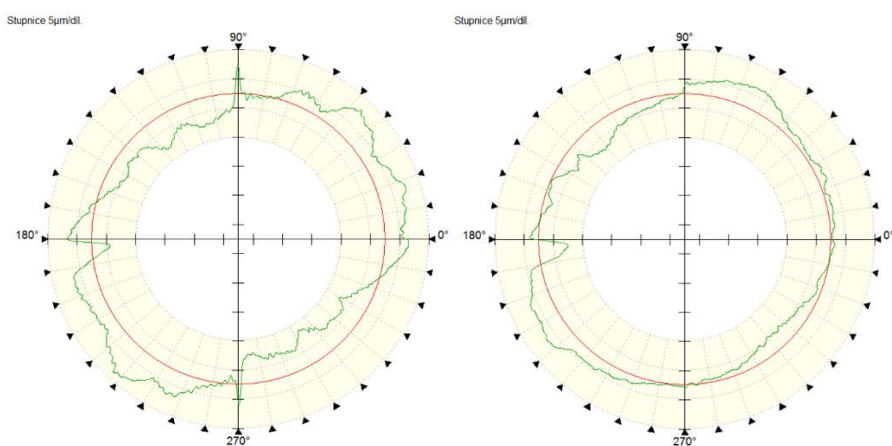
V následujících dvou tabulkách je vyhodnocena vnější kruhovitost (viz. tab. 16) a vnitřní kruhovitost (viz. tab. 17). Na rozdíl od vzorků 1, 2 a 3 bylo možné změřit 8 řezů na vnějším průměru.

Tab 16) Vnější kruhovitosť na vzorcích 4 a 5

Vnější RONT [μm]		
	Vzorek4	Vzorek5
1	12,58	9,25
2	12,55	8,87
3	12,55	8,72
4	12,96	8,66
5	13,11	8,59
6	13,15	8,27
7	13,24	8,18
8	13,63	8,02
Průměr	12,97	8,57

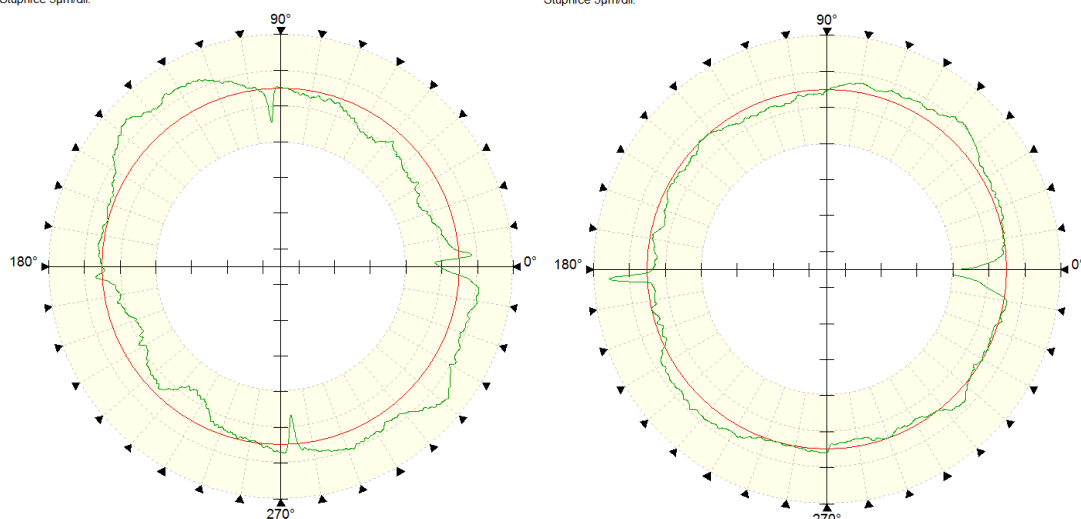
Tab 17) Vnitřní kruhovitosť na vzorcích 4 a 5

Vnitřní RONT [μm]		
	Vzorek4	Vzorek5
1	11,25	14,18
2	10,42	11,26
3	9,61	10,50
4	9,63	9,75
5	9,31	10,30
6	9,19	10,30
Průměr	9,90	11,05



Obr. 67) Porovnání vnější kruhovitosti Vzorek 4 (vlevo) a Vzorek 5 (napravo)

U obou vzorku je možné si všimnout skokových odchylek v bodech reverze posuvů v ose X. U Vzorku 5 je vidět podobný typ odchylky jako u Vzorku 3. Vzorek 4 vykazuje skokové odchylky i v bodech reverze v ose Y, ale jelikož nejsou tak markantní jako u Vzorku 5, je hodnota RONT z nového stroje vyšší. Porovnání je vidět na obrázcích níže.



Obr. 68) Porovnání vnitřních odchylek kruhovitosti vzorků 4 (vlevo) a 5 (napravo)

4.7.2 Válcovitosti a sousost

Následně z naměřených osmi kruhovitostí vnějších a šesti kruhovitostí vnitřních byla vypočítána vnější, respektive vnitřní válcovitost pro oba vzorky. Dále byla vypočítána sousost dle ISO. Tyto hodnoty jsou zpracovány v následující tabulce (viz. tab. 18).

Tab 18) Válcovitost a sousost vzorků 4 a 5

	Vzorek4	Vzorek5
CYLt-Vnější	20,70	12,99
CYLt-Vnitřní	22,49	19,26
COAX	16,84	7,68

4.7.3 Vyhodnocení textury povrchu

Následně bylo podle předešlé stanovené metodiky provedeno vyhodnocení parametrů textury povrchu.[31]

Následně byla dle výkresu vyhodnocena hodnota parametrů Ra a Pc, dle metodiky určené v předchozích kapitolách. Toto vyhodnocení je v tabulce 19 níže.[31]

Tab 19) Vyhodnocení Ra a Pc vzorků 4 a 5

	Vzorek4	Vzorek5
Pc [μm]	0,8639	0,7529
Ra [μm]	0,2441	0,2290

5 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá některými možnostmi multiparametrické diagnostiky vysokootáčkové CNC frézky M8 Cube firmy DATRON. Pro diplomovou práci bylo vytyčeno několik cílů, které byly všechny naplněny.

Prvním cílem bylo navrhnout a doporučit vhodné metody pro multiparametrickou diagnostiku frézky. Firma využívá pouze měření kruhové interpolace, a to při přejímce stroje. Byla doporučena aplikace vibrodiagnostiky a rozšíření metrologické diagnostiky o nové vhodné metrologické parametry zkušební vzorku. Uvedený cíl je splněný v kapitole 2.

Druhým cílem bylo navrhnout zkušební vzorek. Souvisejícími cíli pak byly návrh, realizace a vyhodnocení experimentů s kontrolním vzorkem. Návrh je zpracován v kapitole 3.

Po dohodě s vedením firmy Datron byl navržen kontrolní vzorek. Bylo navrženo, aby zkušební vzorek obsahoval vnější a vnitřní přesný průměr, dvě obdélníkové kapsy a jednu kruhovou kapsu. Bylo navrženo, aby novými metrologickými parametry byly parametry kruhovitosti, válcovitosti, souososti, délkových rozměrů a vybrané parametry textury povrchu. Tyto parametry byly vyhodnoceny jak pomocí starších metod (např. Talyrond Tr595S, Talysurf CCI Lite), tak pomocí moderních optických metod (OptoSurf a Keyence IM7020).

Bylo vytvořeno pět zkušebních vzorků. Vzorky 1-3 byly vytvořeny podle původního programu a vzorky 4-5 byly vytvořeny podle programu nově navrženého firmou Datron na závěr práce. Druhý program se od prvního lišil nejvíce v rychlostech posuvů, které se více než zdvojnásobily (u funkce rampování se dokonce zvýšil z 1000 mm/min na 5000 mm/min). Dále došlo ke změně smyslu obrábění vnějšího průměru. Místo obrábění po spirále jsou v krocích postupně obrobena jednotlivé hloubky průměru. Dle rozhodnutí firmy Datron bude tento nový program využíván pro výrobu všech následujících zkušebních vzorků.

Měřením prvního vzorku byla získána dostatečná data, která přesvědčila firmu DATRON, aby nechali překontrolovat firmware CNC frézky. Firma díky výsledkům v diplomové práci zjistila nesrovnalosti vycházející z lidské chyby – špatně zadaná desetinná čárka při jednom z cyklů. Tato chyba měla za důsledek zvlnění vnějšího průměru.

Po opravě problému byly vytvořeny vzorky 2 a 3. Jeden s aplikovanou technologií softwarového vyhlazení a jeden bez. Vzorek s vyhlazením byl brán jako ideální vzorek a byl porovnán s prvním vzorkem pro zjištění nejcitlivějších parametrů. Pro zjištění těchto parametrů byla vytvořena metodika, která se nejvíce soustředí na vyhodnocení parametrů textury a na vyhodnocení parametru kruhovitosti RONT.

Na základě vyhodnocení citlivosti změn mezi parametry vzorků 1 a 3 byly zvoleny parametry Pc a Ra. K těmto parametrům byly statistickými metodami určeny horní meze a na výkres byly předepsány parametry textury profilu P_cmax 0,8 μm a R_amax 0,4 μm. Kruhovitost a válcovitost byly projednány s vedením firmy. Byl vybrán parametru RONT, jehož hodnota nebyla zvolena statisticky, ale s respektováním technické dokumentace výroby.

Vyhodnocení a porovnání výsledků kruhovitosti bylo náročnější, a to z důvodu, že po opravě softwaru stroje se u nových vzorků začala vyskytovat chyba, která byla

pravděpodobně spojena s axiální vůlí posuvu. Firma o tomto problému byla informována a je domluvená s technologem na praktickém prozkoumání námi objeveného problému, avšak toto prozkoumání se bude odehrávat až po odevzdání a publikování DP.

Předepsané hodnoty a parametry textury povrchu a kruhovitosti vycházejí z měření a porovnání malého množství vzorků a z dohody s vedoucím práce a firmy. Navržené parametry a jejich hodnoty je vhodné považovat za počáteční. V budoucnu je možné doporučit, aby bylo pokračováno s experimenty a na základě měření z několika desítek vzorků byly vytvořeny individuální regulační diagramy pro každý parametr.

Dále bylo provedeno měření vzorků 4 a 5, vyrobených podle nového programu. Vzorek 4 byl obroben na stroji ve firmě EMCO Case a.s s 2kW vřetenem a vzorek 5 byl vyroben na stejném stroji (4 kW vřetenem) jako vzorky 1-3. Bylo provedeno porovnání vzorků 3 a 5. Z výsledků porovnání bylo navrženo ponechání původních parametrů (R_a max 0,4 a P_c max 0,8) i pro vzorky obrobené pomocí nového programu. Vzorek 4 je nový výsledek, který nelze srovnávat s ostatními vzorky, jelikož je obroben na jiném typu vřetene. Pro vřetenem o výkonu 2 kW by měly být navrženy jiné parametry.

Hlavním přínosem diplomové práce bylo navržení kontrolního vzorku, protože se jedná o málo probádanou oblast. Dále při vyhodnocení kruhovitosti bylo provedeno srovnání výsledků kruhovitosti na vzorku s měřením kruhové interpolace pomocí systému Ballbar. Toto poměření je v kapitole 4 a ukazuje, že některé chyby, které mohou být způsobené strojem, se nemusí projevit v nezátíženém stavu, ale až při zatížení.

Dalším přínosem je poukázání na využití moderních technologií. Pokud chceme v současnosti provést vyhodnocení dle této diplomové práce, je třeba využít kruhoměru a interferometru v celkové ceně v řádech milionů korun. Pro praxi je tedy výhodnější, a tedy je to i navrženým doporučením, využívat optické metody, jako například využití systému Optosurf. Tato metoda dosahuje podobných výsledků, a to v kratším čase a s nižšími náklady.

NÁVRHY NA DALŠÍ ROZVOJ METROLOGICKÉ DIAGNOSTIKY

Následující část závěru se věnuje doporučení pro případný další rozvoj výroby kontrolního vzorku. Jako první se naskýtá doporučení k vytvoření a přezkoumání systému geometrických tolerancí na výrobku. Nejen kruhovitosti. Na výkrese už je naznačeno, jakým způsobem pokračovat – tolerování kapes.

Další detailnější analýzu by bylo vhodné provést při měření kruhové interpolace systémem Ballbar. Zatím se provádí pouze měření v posuvech X a Y – tedy kružnice v jedné výšce. Dle normy je možné také vyhodnocovat kombinaci posuvů X a Z, nebo Y a Z – tedy půlkružnice kopírující tvar kopule.

Posledním doporučením je vytvoření kombinace frekvenčních analýz. Více částí diplomové práce má možnost být převedeno rychlou Fourierovou transformací. Právě porovnání těchto spekter by mohlo přinést zajímavé výsledky. Například v poslední kapitole je aplikována FFT na spektrum změřeného pomocí metody Optosurf. Toto spektrum by bylo možné porovnat například se spektrem vibrací při obrábění, se spektrem získaným z profilů textury povrchu, nebo popřípadě se spektrem z kruhoměru.

V diplomové práci se podařilo dosáhnout všech vytyčených cílů. Pomocí aplikovaných a zavedených metod byly zjištěny chyby na stroji před jeho prodejem. Byly popsány a vyzkoušeny některé moderní metrologické metody, stejně tak vytvoření metodiky pro aplikaci stávajících. Bylo vytvořené doporučení pro praxi včetně postupu dalšího rozvoje metody metrologické diagnostiky.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] OPOČENSKÁ, H., M. a M. HAMMER. USE OF MULTIPARAMETRIC DIAGNOSTICS IN PREDICTIVE MAINTENANCE. *MM Science Journal*. 2017, **2017**(5), 2090-2093. ISSN 1805-0476.
- [2] DHILLON, B.S. *Engineering Maintenance a Modern Approach*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002. ISBN 1420031848.
- [3] ČSN EN 60300-3-3. Management spolehlivosti – Pokyn k použití – Analýza LCC. 1. Praha: ÚNMZ, 2005.
- [4] MEIROVITCH, L. *Elements of vibration analysis*. 1. Santa Cruz, California: McGraw-Hill, 1975. ISBN 0-07-041340-1.
- [5] ČSN ISO 10791-7. Podmínky zkoušek pro obráběcí centra - Část 7: Přesnost dokončovaného zkušebního obrobku. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [6] HAMMER, Miloš. *Technická diagnostika I (XT1)* [přednáška]. Brno: Předmět Technická Diagnostika 1 na FSI VUT. 2018
- [7] ŠOLTÉSOVÁ, Stanislava a Petr BARON. The Operation Monitoring Condition of the Production Machinery and Facilities Using the Tools of Technical Diagnostics. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, 308, 105-109. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.308.105. ISSN 1662-7482. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/AMM.308.105>
- [8] HAMMER, Miloš. Spolehlivost 1 (XS1) [přednáška]. Brno: Předmět Spolehlivost 1 na FSI VUT. 2017
- [9] SIVERA, D. Metody analýzy vibračních signálů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..
- [10] JANKOVÝCH, Róbert, Miloš HAMMER, Michal HOLUB, Matej Harčarik a Tadeáš LIPUS. *MĚŘÍCÍ ZPRÁVA II O NOVÝCH METROLOGICKÝCH DIAGNOSTICKÝCH PARAMETRECH*. Brno, 2019.
- [11] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [12] LEGÁT, Václav. *Management a inženýrství údržby*. Druhé doplněné vydání. Praha: Kamil Mařík - Professional Publishing, 2016. ISBN 978-80-7431-163-5.
- [13] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.
- [14] BOWYER, Matouš. Zpráva z diagnostiky XT - 1PRU-AS;AR-BS;AR. Brno, 2018.
- [15] KOPAL, Ivan a Pavol KOŠTIAL. *Základy infračervenej termografie: experimentálne metódy materiálového inžinierstva*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, katedra materiálového inženýrství, 2011. ISBN 978-80-248-2519-9.
- [16] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.

- [17] HAMMER, Miloš. *Technická diagnostika II (XT2)* [přednáška]. Brno: Předmět Technická Diagnostika 2 na FSI VUT. 2018
- [18] GUAN, Liwen, Jiao MO, Meng FU a Liping WANG. An improved positioning method for flank milling of S-shaped test piece. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, **92**(1-4), 1349-1364. DOI: 10.1007/s00170-017-0180-x. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-017-0180-x>
- [19] DATRON Technology s.r.o. [online]. Detva: Datron, 2019 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: <https://www.datrontechnology.cz/cnc-stroje/cnc-frezovani/m8cube/>
- [20] EmcoMill [online]. web: EmcoMill, 2016 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://www.emco-world.us/en/products/industry/milling/cat/27/d/2/p/1000008%2C27/pr/emcomill-1200.html>
- [21] DATRON CNC Milling Tools [online]. Mühltal, DE: Datron, 2019 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: https://www.datron.de/en_gb/cnc-milling-tools/product-range/single-flute-end-mill.html
- [22] DEMAZURE, Dann. 6 EASY WAYS TO OPTIMIZE CNC PROGRAM. *www.datron.com* [online]. Milford, USA: Datron, 2016 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.datron.com/blog/6-easy-ways-to-optimize-cnc-program/>
- [23] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů IV.0*. Praha: MM publishing, 2018. MM speciál. ISBN 978-80-906310-8-3.
- [24] *Ballbar testing explained* [online]. Wotton-under-Edge: Renishaw, 2018 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/ballbar-testing-explained--6818>
- [25] *Systém ballbar QC20-W* [online]. Praha: Renishaw, 2018 [cit. 2018-11-13]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/system-ballbar-qc20-w--11075>
- [26] ČSN ISO 230-4. Zásady zkoušek obráběcích strojů část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů. Druhé. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [27] Online pokyny pro použití systémů Ballbar QC20-W a Ballbar QC10: Dokumentace k softwaru Ballbar. Wotton-under-Edge, 2019.
- [28] ŠRŮT, Petr. *Měření drsnosti pomocí kruhoměru*. Brno 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. 86 s. Vedoucí práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
- [29] ČSN EN ISO 121 80-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) — Válcovitost — Část 1: Slovník a parametry válcovitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [30] ČSN EN ISO 12181 -1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) — Kruhovitost — Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [31] WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.
- [32] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠTÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [33] HARČÁŘÍK, Matej. *Měření parametrů textury povrchu výrobků kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno, 2016. Diplomová. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

- [34] Form Talysurf Intra. In: *Www.taylorhobson.com.br* [online]. UK: Taylor Hobbson, 2007 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://www.taylorhobson.com.br/pdf/105_espec.pdf
- [35] BOWYER, M. Analýza možností kontroly povrchu válce vstřikovacího lisu kontaktní a bezkontaktní metodou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Matej Harčarik.
- [36] ŠPAČKOVÁ, M. Využití parametrů textury povrchu pro posuzování shody a řízení procesu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Matej Harčarik.
- [37] JANKOVÝCH, Róbert. *METROLOGIE TEXTURY POVRCHU I* [přednáška]. Brno: Předmět Praktická metrologie na FSI VUT. 2018
- [38] Keyence *IM-7000 Series Catalog*. Itasca, IL, USA, 2018. Dostupné také z: <https://www.keyence.eu/downloads/?mode=ca&q=>
- [39] STOVER, John C. *Optical scattering: measurement and analysis*. 3rd ed. Bellingham: SPIE Press, c2012. ISBN 978-0-8194-9251-7.
- [40] OptoSurf Technology. *OptoSurf Technology* [online]. Ettlingen, DE: OptoSurf, 2018 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.optosurf.de/en/technologie-2/>
- [41] JANKOVÝCH, Róbert. *Metrologie Textury Povrchu IX - Úhlové rozlišování rozptylu světla* [přednáška]. Brno: Předmět Praktická metrologie na FSI VUT. 2018

7 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

7.1 Seznam zkratk a symbolů

<i>FFT</i>	Fast Fourier Transformation
<i>BPFO</i>	Ball Press Frequency of Outer ring
<i>HDF</i>	High frequency detection
<i>AEE</i>	Acoustic Emission Envelope
<i>TTD</i>	Tribodiagnostika
<i>g</i>	Tíhové zrychlení
<i>l</i>	jmenovitá velikost obrobku typu A
<i>q</i>	strana čtverce na obrobku typu A
<i>p</i>	průměr díry ve středu obrobku typu A
<i>r</i>	vzdálenost děr od střední roviny obrobku typu A
<i>W</i>	šířka plochy obrobku typu B
<i>L</i>	délka plochy obrobku typu B
<i>w</i>	šířka řezu obrobku typu B
<i>UF</i>	United Feature
<i>RON_t</i>	Úchylka kruhovitosti od piku k prohlubni
<i>RON_v</i>	Úchylka kruhovitosti od reference k prohlubni
<i>RON_p</i>	Úchylka kruhovitosti od piku k referenci
<i>UPR</i>	Undulations Per Revolution
<i>CYL_t</i>	Válcovitost
<i>CCI</i> interferometr)	coherence correlation interferometry (koherenční rastrovací
<i>P_z</i>	nejvyšší výška základního profilu
<i>P_p</i>	největší výška výstupku základního profilu
<i>P_v</i>	největší hloubka prohlubně základního profilu
<i>W_z</i>	nejvyšší výška profilu vlnitosti
<i>W_p</i>	největší výška výstupku profilu vlnitosti
<i>W_v</i>	největší hloubka prohlubně profilu vlnitosti
<i>R_z</i>	největší výška profilu pro profil drsnosti
<i>R_p</i>	největší výška výstupku profilu drsnosti
<i>R_v</i>	největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
<i>S_z</i>	maximální výšky posuzované plochy
<i>S_p</i>	maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu

<i>Sv</i>	maximální hloubka dna posuzovaného povrchu
<i>Pa</i>	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro základní profil
<i>Wa</i>	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro profil vlnitosti
<i>Ra</i>	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro profil drsnosti
<i>Sa</i>	průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu
<i>Pq</i>	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro základní profil
<i>Wq</i>	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro profil vlnitosti
<i>Rq</i>	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro profil drsnosti
<i>Sq</i>	průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu
<i>Pc</i>	průměrná výška prvků základního profilu
<i>Wc</i>	průměrná výška prvků profilu vlnitosti
<i>Rc</i>	průměrná výška prvků profilu drsnosti
<i>Aqm</i>	střední hodnota $Aq(i)$ z vícenásobného měření
<i>Aqs</i>	směrodatná odchylka $Aq(i)$ z vícenásobného měření
<i>Aqt</i>	neboli rozpětí hodnot $Aq(i)$ z vícenásobného měření

7.2 Seznam tabulek

TAB 1) VYUŽITÍ VIBRODIAGNOSTIKY PRO ČERPADLO	15
TAB 2) VELIKOSTI (V MILIMETRECH) ROZMĚRŮ ZKUŠEBNÍHO VZORKU A.....	27
TAB 3) ROZMĚR ZKUŠEBNÍHO OBROBKU B	28
TAB 4) PARAMETRY SYSTÉMU BALLBAR	35
TAB 5) PODÍL CHYB K CELKOVÉ ODCHYLCE TVARU	37
TAB 6) POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ SYSTÉMEM BALLBAR	41
TAB 7) HODNOTY RONT VNITŘNÍHO PRŮMĚRU	43
TAB 8) HODNOTY RONT VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU	44
TAB 9) VYHODNOCENÍ VÁLCOVITOSTI VNITŘNÍHO PRŮMĚRU	45
TAB 10) VYHODNOCENÍ VÁLCOVITOSTI VNĚJŠÍHO PRŮMĚRU	45
TAB 11) PARAMETRY ODCHYLEK OD KRUŽNICE NEJMENŠÍCH ČTVERCŮ	46
TAB 12) POROVNÁNÍ VÝŠKOVÝCH PARAMETRŮ Z TALYSURFCCI.....	63
TAB 13) POROVNÁNÍ PLOŠNÝCH PARAMETRŮ TEXTURY	64
TAB 14) POROVNÁNÍ PARAMETRŮ Z MĚŘENÍ PROFILŮ NA KRUHOMĚRU.....	64
TAB 15) POROVNÁNÍ ROZMĚRŮ VZORKŮ	66
TAB 16) VNĚJŠÍ KRUHOVITOST NA VZORCÍCH 4 A 5	72
TAB 17) VNITŘNÍ KRUHOVITOST NA VZORCÍCH 4 A 5	72
TAB 18) VÁLCOVITOST A SOUOSOST VZORKŮ 4 A 5.....	73
TAB 19) VYHODNOCENÍ RA A PC VZORKŮ 4 A 5.....	73

7.3 Seznam obrázků

OBR. 1) VZTAH MEZI SPOLEHLIVOSTÍ A DIAGNOSTIKOVATELNOSTÍ	14
OBR. 2) ROZDĚLENÍ TECHNICKÉ DIAGNOSTIKY	14
OBR. 3) PRINCIP SKLÁDÁNÍ SIGNÁLŮ VIBRACÍ.....	16
OBR. 4) FREKVENČNÍ ANALÝZA VIBRACÍ LOŽISKA SKF 6056.....	17
OBR. 5) UMÍSTĚNÍ SNÍMAČŮ RELATIVNÍCH VIBRACÍ.....	17
OBR. 6) ČISTÝ (VLEVO) A ZANESENÝ (VPRAVO) MEMBRÁNOVÝ FILTR	19
OBR. 7) ZNÁZORNĚNÍ EMISIVITY, TRANSMISIVITY A REFLEXIVITY....	20
OBR. 8) VLIV TVARU A VELIKOSTI SILOČAR NA POVRCHOVÝCH DEFEKTECH.....	21
OBR. 9) DATRON M8 CUBE.....	25
OBR. 10) FOTKA ZKUŠEBNÍHO OBROBKU TYPU A	26
OBR. 11) ALTERNATIVNÍ OBROBEK VE TVARU S	26
OBR. 12) DRÁHY FRÉZOVÁNÍ ZKUŠEBNÍHO VZORKU	29
OBR. 13) FRÉZA VYUŽITÁ PRO OBRÁBĚNÍ.....	30
OBR. 14) POLOTOVAR ZKUŠEBNÍHO VZORKU	30
OBR. 15) NÁČRT NÁVRHU POLOTOVARU (NAHOŘE) A OBRÁBĚNÝCH PLOCH (DOLE)	31
OBR. 16) ZKUŠEBNÍ VZOREK PO OBROBENÍ	31
OBR. 17) SOFTWARE VYHLAZENÍ	32
OBR. 18) BALLBAR S NAZNAČENÝM SYSTÉMEM HODNOCENÍ KRUHOVÉ INTERPOLACE VE VŠECH OSÁCH.....	34
OBR. 19) KALIBRACE BALLBARU	35
OBR. 20) PRŮBĚH MĚŘENÍ BALLBAREM	36
OBR. 21) VÝSTUP Z VYHODNOCENÍ KRUHOVÉ INTERPOLACE NA STROJI DATRON M8 CUBE POMOCÍ BALLBARU 100 MM	36
OBR. 22) VÝSLEDNÉ HODNOTY MĚŘENÍ V NEZATÍŽENÉM STAVU	37
OBR. 23) CHARAKTERISTICKÉ VYOBRAZENÍ AXIÁLNÍ VŮLE	38
OBR. 24) CHARAKTERISTICKÉ VYOBRAZENÍ ZPOŽDĚNÍ SERVA	38
OBR. 25) CYKlická CHYBA	39
OBR. 26) PŘÍKLAD TROJLALOČNÉHO OBRAZEC V DŮSLEDKU CHYBY PŘÍMOČAROSTI.....	39
OBR. 27) VÝSLEDNÝ PROTOKOL MĚŘENÍ ODCHYLKY INTERPOLACE..	40
OBR. 28) POROVNÁNÍ VŠECH TŘÍ TESTŮ (300/150/100 MM)	40
OBR. 29) KRUHOMĚR TALYROND TR595S	42
OBR. 30) MĚŘENÍ KRUHOVITOSTI VNITŘNÍHO PRŮMĚRU	42
OBR. 31) NASTAVENÍ MĚŘENÍ NA KRUHOMĚRU	43

OBR. 32) POROVNÁNÍ VNITŘNÍ KRUHOVITOSTI VZORKŮ 1 (VLEVO) A 3 (NAPRAVO)	44
OBR. 33) POROVNÁNÍ VNĚJŠÍ KRUHOVITOSTI VZORKŮ 1 (VLEVO) A 3 (VPRAVO)	45
OBR. 34) POROVNÁNÍ DAT VNĚJŠÍ KRUHOVITOSTI VZORKU 1 A BALLBARU V CHODU PROTI SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK	47
OBR. 35) POROVNÁNÍ DAT VNĚJŠÍ KRUHOVITOSTI VZORKU 2 A BALLBARU V CHODU PROTI SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK	47
OBR. 36) POROVNÁNÍ DAT VNĚJŠÍ KRUHOVITOSTI VZORKU 3 A BALLBARU V CHODU PROTI SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK	47
OBR. 37) POROVNÁNÍ DAT VNITŘNÍ KRUHOVITOSTI VZORKU 1 A BALLBARU V CHODU PROTI SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK	48
OBR. 38) POROVNÁNÍ DAT VNITŘNÍ KRUHOVITOSTI VZORKU 2 A BALLBARU V CHODU PROTI SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK	48
OBR. 39) POROVNÁNÍ DAT VNITŘNÍ KRUHOVITOSTI VZORKU 3 A BALLBARU V CHODU PROTI SMĚRU HODINOVÝCH RUČÍČEK	49
OBR. 40) METODA ZJIŠTĚNÍ VŮLE POSUVU	49
OBR. 41) MĚŘÍCÍ BODY NA VZORCÍCH	50
OBR. 42) NAMĚŘENÁ PLOCHA VZORKU1, BOD 4.....	51
OBR. 43) PLOCHA S DOPOČÍTANÝMI CHYBĚJÍCÍMI BODY VZORKU 1, BOD 4	51
OBR. 44) PLOCHA S ODSTRANĚNÝM TVAREM (LEVELED SURFACE) VZORKU 1, BOD 4.....	52
OBR. 45) POROVNÁNÍ PLOCH BEZ ODFILTROVANÉHO TVARU (VLEVO) A S ODFILTROVANÝM TVAREM (VPRAVO) VZORKU 1, BOD 4	52
OBR. 46) ZNÁZORNĚNÍ ZVLNĚNÍ SEŠITÝCH PLOCH VZORKU 1-BOD4 (VLEVO) A VZORKU 3-BOD4 (VPRAVO)	53
OBR. 47) PROFILY Z BODU Č.4 VZORKU 1	53
OBR. 48) NASTAVENÍ PŘÍTLAČNÉ SÍLY	54
OBR. 49) ZÓNY PRO EXTRAKCI VYHODNOCOVACÍCH DÉLEK	54
OBR. 50) CELKOVÝ PROFIL OBVODU VZORKU 1	55
OBR. 51) CELKOVÝ PROFIL OBVODU VZORKU 3	55
OBR. 52) ZNÁZORNĚNÍ PARAMETRU NEJvyšší VÝŠKY PROFILU DRSNOSTI.....	57
OBR. 53) ZNÁZORNĚNÍ PARAMETRU NEJvyšší VÝŠKY VÝSTUPKU PROFILU DRSNOSTI.....	57
OBR. 54) ZNÁZORNĚNÍ PARAMETRU NEJvyšší HLOUBKY PROHLUBNĚ PROFILU DRSNOSTI.....	58
OBR. 55) ZNÁZORNĚNÍ PARAMETRU PRŮMĚRNÉ ARITMETICKÉ ÚCHYLKY POSUZOVANÉHO PROFILU DRSNOSTI.....	59

OBR. 56) ZNÁZORNĚNÍ PARAMETRU PRŮMĚRNÉ KVADRATICKÉ ÚCHYLKY POSUZOVANÉHO PROFILU DRSNOSTI.....	60
OBR. 57) ZNÁZORNĚNÍ PRŮMĚRNÉ VÝŠKY PRVKŮ PROFILU DRSNOSTI RC 61	
OBR. 58) VÝSTUP Z MĚŘENÍ ROZMĚRŮ VZORKU 1.....	65
OBR. 59) VÝSTUP Z MĚŘENÍ ROZMĚRŮ VZORKU 3.....	66
OBR. 60) PŘÍSTROJ KEYENCE IM7020	67
OBR. 61) VÝSTUP Z MĚŘENÍ NA PŘÍSTROJI KEYENCE	68
OBR. 62) SNÍMACÍ SONDA OPTOSURF	68
OBR. 63) VÝSLEDEK MĚŘENÍ VZORKU 1 POMOCÍ OPTOSURF.....	70
OBR. 64) VYHODNOCENÍ KRUHOVITOSTI POMOCÍ PŘÍSTROJE OPTOSURF.....	70
OBR. 65) NAMĚŘENÁ DATA (MAPA VELIKOSTÍ ODCHYLEK NA PRŮMĚRU - 360°).....	71
OBR. 66) FREKVENČNÍ SPEKTRUM – ZÁVISLOST AMPLITUDY NA POČTU VLN NA OTÁČKU.....	71
OBR. 67) POROVNÁNÍ VNĚJŠÍ KRUHOVITOSTI VZOREK 4 (VLEVO) A VZOREK 5 (NAPRAVO).....	72
OBR. 68) POROVNÁNÍ VNITŘNÍCH ODCHYLEK KRUHOVITOSTI VZORKŮ 4 (VLEVO) A 5 (NAPRAVO)	73

8 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – CD (výstup z měření kruhovitosti, válcovitosti, souososti a textury povrchu)
- Příloha 2 – Výkres navrženého kontrolního vzorku
- Příloha 3 – Program pro výrobu vzorků 1-3
- Příloha 4 – Program pro výrobu vzorků 4-5
- Příloha 5 – Výsledky z TH CCI
- Příloha 6 – Porovnání všech parametrů ISO 25178 a ISO 4287
- Příloha 7 – Porovnání všech parametrů ISO 25178 a ISO 4287 vzorků 4 a 5

PŘÍLOHA 3 - PROGRAM PRO VÝROBU VZORKŮ 1-3

```
module Frezovaci_tester
@ MeasuringSystem = "Metric" @
# Workpiece dimensions
@WorkpieceGeometry:"MinEdge":{"X":-30.00000,"Y":-30.00000,"Z":-
20.00000},"MaxEdge":{"X":+30.00000,"Y":+30.00000,"Z":+0.00000}@
using Base
#First place insert this import
import Development
export program Main
#Second fix set the settings (segmentation usw..) to a finer resolution
#Now the stuff in um
Dynamic=5
Development::ArcDiscretizeSettings      tolerance=0.0005      maxSegmentLength=0.035
maxSegmentAngle=0.05
Tool type="0068086E" newRpm=37000
SetFeedTechnology roughing=2000 finishing=2000 ramp=1000
#Smoothing On allowedDeviation=0.01
Smoothing Off
#LoadWcs name="StredSklicidla"
#SafeRapid X=0 Y=0 Z=15
#CircleMeasure view=MeasuringView.Outside diameter=60 rotation=0 measureZPos=-2
zMeasureXShift=5      zMeasureYShift=5      retractDistance=15      searchDistance=15
resultCs=CsType.Lcs originXShift=0 originYShift=0 originZShift=15
#OptionalBreak
#CircleMeasure view=MeasuringView.Outside diameter=60 rotation=0 measureZPos=1.5
zMeasureXShift=5 zMeasureYShift=5 resultCs=CsType.Lcs originXShift=0 originYShift=0
originZShift=0
#pouziva: roughing, finishing
CircleFromMid      diameter=58      depth=7      strokeRapidZ=14      strokeCuttingZ=1
mode=ContourMode.Outside infeedZ=2.5 finishingXY=0.4 infeedFinishingZ=7 finishingZ=0
#pouziva: roughing, ramp, finishing
CircleCavity diameter=54 depth=5 strokeRapidZ=14 strokeCuttingZ=1 infeedZ=1
distanceStepover=1
SafeRapid X=-3 Y=10 Z=15
#pouziva: roughing, ramp, finishing
```

RectangleCavity widthX=34 widthY=14 depth=5 strokeRapidZ=19 strokeCuttingZ=1
infeedZ=1

SafeRapid X=-3 Y=-10 Z=15

#pouziva: roughing, ramp, finishing

RectangleCavity widthX=34 widthY=14 depth=5 strokeRapidZ=19 strokeCuttingZ=1
infeedZ=1

SafeRapid X=20 Y=0 Z=15

#pouziva: roughing, finishing

DrillMilling diameter=11 depth=5 strokeRapidZ=19 strokeCuttingZ=1 infeedZ=0.5

SafeRapid X=-50 Y=200 Z=100

#MoveToParkPosition

endprogram

end

PŘÍLOHA 4 - PROGRAM PRO VÝROBU VZORKŮ 4-5

module MasterCamGenratedProgram

@ ToolDescription : "Name":"3_68086E - D6.0 Z1 L50", "Category":"MillingEndFlat",
"ArticleNr":"0068086E", "ToolNumber":3, "Vendor":"DATRON", "Diameter":6,
"TipAngle":45, "TipDiameter":0, "FluteLength":10, "CornerRadius":0, "ShoulderLength":16,
"ShoulderDiameter":5.5, "BodyLength":20, "NumberOfFlutes":1, "ThreadPitch":0,
"ShaftDiameter":6, "OverallLength":20 @

Workpiece dimensions

@ WorkpieceGeometry : "MinEdge":{"X":-30.00000,"Y":-30.00000,"Z":-
70.00000}, "MaxEdge":{"X":+30.00000,"Y":+30.00000,"Z":+0.00000} @

@ EmbeddedSequences = true @

sequence SEQUENCE_3

sequence SEQUENCE_5

sequence SEQUENCE_2

sequence SEQUENCE_4

using Base

export program Main # zylinder_new

Absolute

Operation_3 # große tasche

Operation_5 # schrappen

Operation_2 # schrappen

Operation_4 # außenkontur

Spindle Off

ReleaseDoor

endprogram # zylinder_new

program Operation_3

BeginBlock name="große tasche"

Tool name= "3_68086E - D6.0 Z1 L50" newRpm=38000 skipRestoring

SetFeedTechnology finishing=5000 approach=3000 plunge=5000 ramp=5000
roughing=5000

Smoothing On allowedDeviation=0.012

Dynamic=3

SEQUENCE_3

EndBlock

endprogram

program Operation_5

BeginBlock name="schruppen"

Tool name= "3_68086E - D6.0 Z1 L50" newRpm=38000 skipRestoring

SetFeedTechnology finishing=5000 approach=3000 plunge=5000 ramp=5000
roughing=5000

Smoothing On allowedDeviation=0.012

Dynamic=3

SEQUENCE_5

EndBlock

endprogram

program Operation_2

BeginBlock name="schruppen"

Tool name= "3_68086E - D6.0 Z1 L50" newRpm=38000 skipRestoring

SetFeedTechnology finishing=5000 approach=3000 plunge=5000 ramp=5000
roughing=5000

Smoothing On allowedDeviation=0.012

Dynamic=3

SEQUENCE_2

EndBlock

endprogram

program Operation_4

BeginBlock name="außenkontur "

Tool name= "3_68086E - D6.0 Z1 L50" newRpm=37000 skipRestoring

SetFeedTechnology finishing=5000 approach=3000 plunge=5000 ramp=5000
roughing=5000

Smoothing On allowedDeviation=0.012

Dynamic=3

SEQUENCE_4

EndBlock

endprogram

end

PŘÍLOHA 5 - VÝSLEDKY Z TH CCI

	VZOREK 1				VZOREK 3			
	Bod 2	Bod 4	Bod 6	Bod 8	Bod 2	Bod 4	Bod 6	Bod 8
Pz	3,442	9,030	4,050	4,144	3,842	3,071	3,569	3,823
Wz	0,976	2,997	0,717	0,861	0,455	0,627	0,599	0,532
Rz	1,987	4,400	2,694	1,987	2,018	1,651	1,818	1,902
Sz	16,084	22,548	20,712	21,126	21,492	16,259	23,444	23,282
Pv	1,595	3,977	2,190	1,680	1,566	1,354	1,597	1,631
Wv	0,398	1,562	0,410	0,351	0,217	0,231	0,216	0,180
Rv	0,981	1,997	1,293	1,005	1,037	0,830	0,966	0,990
Sv	9,574	12,306	10,734	12,335	9,572	5,955	10,062	9,945
Pp	1,847	5,052	1,860	2,463	2,276	1,717	1,972	2,193
Wp	0,578	1,435	0,307	0,510	0,237	0,397	0,383	0,352
Rp	1,006	2,402	1,402	0,982	0,981	0,821	0,852	0,912
Sp	6,510	10,242	9,978	8,792	11,920	10,303	13,382	13,338
Pa	0,554	1,889	0,665	0,564	0,516	0,432	0,523	0,459
Wa	0,291	0,989	0,181	0,240	0,104	0,161	0,148	0,127
Ra	0,288	0,992	0,438	0,260	0,303	0,194	0,208	0,212
Sa	1,011	1,984	1,020	0,954	0,977	0,914	1,098	0,942
Pq	0,662	2,145	0,805	0,715	0,653	0,528	0,633	0,578
Wq	0,329	1,086	0,211	0,274	0,126	0,184	0,170	0,147
Rq	0,352	1,117	0,535	0,331	0,366	0,248	0,269	0,279
Sq	1,296	2,346	1,302	1,219	1,241	1,169	1,408	1,237

PŘÍLOHA 6 - POROVNÁNÍ VŠECH PARAMETRŮ ISO 25178 A ISO 4287

Název	VZOREK1 - bod 4	VZOREK3 - bod 4	Změna	Název	VZOREK1 - bod 4	VZOREK3 - bod 4	Změna
Wsk	-0,11965	0,217068	-281%	Sda	0,010286	0,004604	-55%
Rsk	0,102723	-0,16127	-257%	Sa	1,983782	0,914396	-54%
Smr	0,002355	0,000191	-92%	S10z	19,36338	9,297463	-52%
Shv	1,15E-06	1,40E-07	-88%	Sv	12,30616	5,9555	-52%
Wv	1,561525	0,230887	-85%	Sq	2,346052	1,168811	-50%
Pc	6,499297	1,041701	-84%	Vvc	0,002949	0,001479	-50%
Wa	0,988871	0,160938	-84%	Smc	3,02217	1,525793	-50%
Wq	1,085903	0,184488	-83%	Sxp	3,995412	2,031563	-49%
RSm	0,240123	0,041432	-83%	Vv	0,003121	0,001595	-49%
Wdc	2,397146	0,415782	-83%	Spc	882,6723	476,7635	-46%
Wdq	0,432879	0,077726	-82%	Svk	1,164236	0,669315	-43%
Rdc	2,243094	0,419065	-81%	Sk	3,968986	2,417497	-39%
Ra	0,992288	0,194202	-80%	Vvv	0,000172	0,000117	-32%
PSm	0,553818	0,113358	-80%	Vm	9,93E-05	6,96E-05	-30%
Pdc	4,416426	0,924539	-79%	Vmp	9,93E-05	6,96E-05	-30%
Wz	2,996973	0,62743	-79%	Sz	22,54835	16,2589	-28%
Rq	1,117306	0,247919	-78%	S5p	7,897634	5,835202	-26%
Pa	1,889068	0,431741	-77%	Rdq	5,684254	4,396815	-23%
Wt	2,998425	0,707434	-76%	Spk	1,243125	0,974095	-22%
Pq	2,144556	0,528452	-75%	Sdr	2,136835	1,704199	-20%
Sdv	8,14E-07	2,02E-07	-75%	Pdq	5,543223	4,582363	-17%
Rc	2,447212	0,615564	-75%	Sdq	0,213956	0,188767	-12%
Wp	1,435448	0,396542	-72%	Smr2	92,092	91,0135	-1%
Sal	0,140878	0,040889	-71%	Std	90,00137	90,03822	0%
Str	0,168352	0,049263	-71%	Sp	10,24219	10,3034	1%
S5v	11,46575	3,46226	-70%	Wku	1,467184	1,972681	34%
Pp	5,052431	1,717398	-66%	Smr1	8,992	14,0135	56%
Pz	9,029771	3,071288	-66%	Sku	2,326269	3,635541	56%
Pt	9,029771	3,071288	-66%	Pku	1,950815	3,25377	67%
Pv	3,97734	1,35389	-66%	Rku	1,865333	3,714072	99%
Rp	2,402362	0,820883	-66%	Wmr	44,50779	97,39602	119%
Rz	4,399517	1,650848	-62%	Psk	0,109159	0,244478	124%
Rt	4,423831	1,694624	-62%	Ssk	0,145574	0,433991	198%
Sha	0,010943	0,004318	-61%	Spd	54,51869	205,7172	277%
Rv	1,997156	0,829965	-58%	Rmr	12,78153	68,64531	437%
Vmc	0,002392	0,001002	-58%	Pmr	2,77001	15,41646	457%

PŘÍLOHA 7 - POROVNÁNÍ VŠECH PARAMETRŮ ISO 25178 A ISO 4287 VZORKŮ 4 A 5

Parametr /Měřený bod	VZOREK-4				VZOREK-5			
	2	4	6	8	2	4	6	8
Sq	0,529	0,590	0,521	0,604	0,442	0,478	0,431	0,497
Ssk	0,120	0,204	0,606	0,125	-0,115	-0,087	-0,071	-0,084
Sku	3,221	3,121	7,159	3,666	3,381	2,974	3,091	2,972
Sp	4,357	3,718	9,824	8,080	2,241	2,616	1,971	2,632
Sv	3,484	3,200	2,891	3,170	3,093	2,267	2,304	2,570
Sz	7,840	6,918	12,715	11,250	5,335	4,884	4,274	5,203
Sa	0,419	0,470	0,400	0,480	0,350	0,382	0,343	0,398
Smc	0,687	0,767	0,661	0,769	0,556	0,615	0,549	0,638
Sxp	1,005	1,081	0,938	1,159	0,896	0,972	0,874	0,995
Sal	0,050	0,107	0,044	0,109	0,029	0,035	0,028	0,051
Str	0,060	0,129	0,053	0,132	0,035	0,054	0,034	0,067
Std	89,989	89,222	88,980	88,722	89,987	89,486	89,998	89,502
Sdq	0,156	0,162	0,164	0,159	0,149	0,148	0,153	0,150
Sdr	1,177	1,273	1,265	1,229	1,087	1,064	1,148	1,094
Vm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Spc	341,315	341,521	450,324	413,090	277,545	268,033	270,291	281,342
S10z	4,878	4,881	8,601	6,229	2,888	3,082	2,610	2,672
S5p	3,024	2,907	6,462	4,236	1,418	1,653	1,290	1,329
S5v	1,854	1,974	2,140	1,993	1,471	1,429	1,321	1,343
Sda	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,000	0,001
Sha	0,001	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,000	0,001
Sk	1,088	1,322	1,172	1,429	1,014	1,141	1,062	1,282
Spk	0,407	0,605	0,607	0,628	0,368	0,405	0,371	0,385
Svk	0,506	0,541	0,561	0,581	0,399	0,458	0,426	0,476
Smr1	10,121	11,390	10,763	10,031	9,447	9,498	9,586	8,879
Smr2	90,071	90,690	88,613	89,181	90,447	90,148	89,986	90,729
Pp	1,087	1,312	1,494	1,421	0,909	1,102	0,913	1,192
Pv	0,997	1,298	1,147	1,399	0,834	0,987	0,851	1,105
Pz	2,083	2,610	2,641	2,820	1,742	2,089	1,764	2,297
Pc	0,760	0,885	0,798	1,012	0,676	0,826	0,628	0,881
Pt	2,083	2,610	2,641	2,820	1,742	2,089	1,764	2,297
Pa	0,285	0,402	0,307	0,425	0,244	0,313	0,222	0,342
Pq	0,346	0,489	0,389	0,523	0,300	0,385	0,279	0,419
Ps	0,287	0,073	0,336	-0,022	0,014	0,051	0,063	0,024
Pku	2,894	2,541	6,148	2,901	2,813	2,724	3,166	2,711
PSm	0,131	0,123	0,097	0,133	0,118	0,136	0,083	0,127
Pdq	3,420	4,081	4,032	3,906	2,612	2,581	3,072	3,040
Pmr	43,884	31,138	36,208	28,807	62,188	42,515	62,831	35,662
Pdc	0,616	0,879	0,657	0,921	0,529	0,680	0,463	0,743
Rp	0,827	0,952	0,904	0,969	0,730	0,874	0,768	0,865
Rv	0,706	0,857	0,769	1,039	0,631	0,702	0,623	0,834

Rz	1,533	1,809	1,674	2,008	1,362	1,576	1,391	1,699
Rc	0,543	0,676	0,619	0,815	0,562	0,748	0,561	0,760
Rt	1,553	1,872	1,728	2,015	1,371	1,589	1,400	1,721
Ra	0,225	0,254	0,179	0,319	0,198	0,244	0,191	0,283
Rq	0,274	0,316	0,234	0,390	0,246	0,301	0,240	0,340
Rsk	0,496	0,507	0,403	-0,288	0,153	0,281	0,370	-0,105
Rku	2,920	3,111	5,809	2,966	2,990	2,798	3,256	2,505
RSm	0,076	0,072	0,060	0,095	0,104	0,107	0,068	0,100
Rdq	3,301	3,985	3,700	3,833	2,452	2,437	2,906	2,814
Rmr	73,371	56,221	74,303	59,131	82,983	64,671	79,749	62,828
Rdc	0,475	0,593	0,384	0,681	0,410	0,526	0,390	0,621
Wp	0,209	0,345	0,212	0,360	0,136	0,202	0,094	0,203
Wv	0,171	0,317	0,261	0,324	0,135	0,210	0,070	0,182
Wz	0,380	0,662	0,472	0,684	0,270	0,412	0,164	0,385
Wc	0,354	0,289	0,263	0,341	0,240	0,199	0,083	0,157
Wt	0,381	0,698	0,493	0,697	0,276	0,425	0,173	0,402
Wa	0,117	0,198	0,132	0,197	0,078	0,109	0,042	0,100
Wq	0,130	0,222	0,151	0,227	0,090	0,127	0,050	0,117
Wsk	0,310	0,223	-0,198	0,094	0,058	0,068	0,240	0,033
Wku	1,629	1,802	2,023	1,812	1,797	2,115	2,134	2,150
WSm	0,714	0,430	0,555	0,526	0,566	0,410	0,505	0,414
Wdq	0,064	0,098	0,055	0,097	0,043	0,051	0,023	0,045
Wmr	100	98,087	99,333	98,143	99,957	99,874	100	99,881
Wdc	0,280	0,476	0,326	0,497	0,190	0,265	0,102	0,252